



Samuel Franco Rodrigues Santos

Licenciado em Ciências de Engenharia do Ambiente

Contribuição para o estudo da otimização da operação de lavagem dos filtros da ETA de Monte Novo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia do Ambiente, perfil de Engenharia Sanitária

Orientador: Prof. Doutor António Pedro de Macedo Coimbra Mano,
Professor Auxiliar, FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Fevereiro 2017



Samuel Franco Rodrigues Santos

Licenciado em Ciências de Engenharia do Ambiente

Contribuição para o estudo da otimização da operação de lavagem dos filtros da ETA de Monte Novo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia do Ambiente, perfil de Engenharia Sanitária

Orientador: Prof. Doutor António Pedro de Macedo Coimbra Mano,
Professor Auxiliar, FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Fevereiro 2017

Contribuição para o estudo da otimização da operação de lavagem dos filtros da ETA de Monte Novo

© Copyright em nome de Samuel Franco Rodrigues Santos da FCT/UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Para a elaboração da presente dissertação muito contribuiu o apoio e estímulo de várias pessoas, a quem desejo expressar o meu reconhecimento.

Ao Professor Doutor António Pedro Mano, orientador da dissertação, agradeço por toda a disponibilidade que sempre demonstrou, mas principalmente por toda a sabedoria, confiança e motivação que me transmitiu.

Ao Grupo Águas de Portugal, em particular ao Eng.º Pedro Fontes, Eng.º Joaquim Lizardo, Eng.º José Botelho e Eng.º Joaquim Baetas, bem como a toda a equipa operacional da ETA de Monte Novo agradeço a disponibilização dos dados necessários à realização deste trabalho bem como pela receptividade demonstrada.

Aos meus colegas e amigos da Faculdade de Ciências e Tecnologias agradeço o apoio que sempre demonstraram, bem como a tolerância e amizade de todos os colegas que ao longo do meu percurso universitário partilharam casa comigo.

A todos os meus amigos, mas principalmente aos que cresceram a meu lado, Pedro, Diogo e Henrique, por estarem presentes nos momentos mais felizes da minha vida, mas também nos mais difíceis.

À minha namorada e colega Rita Dias pela força, encorajamento, paciência e, principalmente, pelo amor demonstrado ao longo deste período tão feliz das nossas vidas.

Finalmente, mas sempre como as primeiras presenças no meu coração agradeço aos meus pais, pelo apoio incondicional que me deram ao longo do meu percurso académico, mas principalmente por todos os valores transmitidos ao longo de toda a minha vida. Quero também fazer um agradecimento a toda a minha família, especialmente aos meus avós, sem esquecer a Memória do meu falecido avô materno.

RESUMO

A presente dissertação centrou-se no estudo da otimização da lavagem dos filtros da estação de tratamento de água de Monte Novo, com o objetivo de contribuir para a redução dos consumos energéticos e do volume de água necessário nesta operação.

Estudou-se em detalhe as características da água ao longo da linha tratamento, principalmente a montante e jusante do sistema de filtração instalado, tendo-se avaliado a possibilidades de alteração do método de lavagem em vigor, garantindo sempre os parâmetros de qualidade legislados.

Do estudo realizado conclui-se que um dos métodos de lavagem avaliados, que inclui um total de três etapas, de 3 minutos cada, sendo a primeira efetuada exclusivamente com ar, a segunda com ar e água e a terceira apenas com água, poderá ser uma alternativa ao método atualmente utilizado. Este método não compromete a qualidade da água filtrada e permite reduzir o volume de água utilizado nesta operação, em cerca de 22,6%, reduzindo igualmente os consumos energéticos na ordem dos 20%.

Palavras-chave: Tratamento de água, Filtração em leito granular, Otimização da lavagem dos filtros.

ABSTRACT

The main goal of this dissertation was to revise the optimization of the washing operation filters in the Monte Novo's water treatment plant in order to reduce the energy consumptions as well as the water volume needed.

To achieve this objective, a detailed study of the water characteristics was carried throughout the treatment's process, mainly upstream and downstream of the installed filtration system.

Afterwards, the possibilities of changing the current water method were also evaluated, always making sure that its legislated quality standards were followed.

From the study, it was concluded that one of the washing methods, which includes three steps of three minutes each, the first being performed exclusively with air, the second with air and water and the third with only water, may be an alternative to the currently used method. This method does not compromise the quality of the filtered water and allows a volume reduction of water used in this operation, by 22,6%, also reducing energy consumption by 20%.

Keywords: Water treatment, Granular bed filtration, Backwashing optimisation.

Índice de matérias

1. Introdução	1
2. Organização da dissertação	3
3. Revisão bibliográfica	5
3.1. Qualidade da água	5
3.2. Enquadramento legal	7
3.3. Tratamento de água para consumo humano	8
3.4. Principais etapas de tratamento utilizadas em água para abastecimento	9
3.4.1. Coagulação-Floculação	9
3.4.2. Decantação	10
3.4.3. Filtração	11
3.4.4. Desinfeção	12
3.5. Filtração em leito granular	13
3.5.1. Teoria da filtração em leito granular	13
3.5.2. Filtros rápidos de areia a caudal constante e nível variável	20
3.5.3. Lavagem dos filtros.....	22
3.5.4. Análise do desempenho dos filtros.....	23
3.6. Consumo energético em ETA.....	25
4. Metodologia.....	27
4.1. Descrição sumária	27
4.2. Águas de Lisboa e Vale do Tejo, S.A.:.....	27
4.3. Caso de Estudo – ETA de Monte Novo	29
4.3.1. Enquadramento	29
4.3.2. Descrição da ETA de Monte Novo	30
4.3.3. Reagentes utilizados.....	33
4.3.4. Filtros instalados.....	34
4.3.5. Caracterização energética da ETA.....	35
4.4. Desenvolvimento do estudo	38
5. Resultados e discussão.....	39
5.1. Descrição sumária	39
5.2. Características quantitativas da água a tratar	39

5.3. Características qualitativas da água captada e tratada	40
5.4. Eficiência da operação de filtração	51
5.5. Análise da operação de lavagem dos filtros.....	55
5.6. Caraterização do atual método de lavagem dos filtros	62
5.7. Alteração do método de lavagem dos filtros	64
5.7.1. Descrição sumária	64
5.7.2. Aumento do tempo de fase de lavagem só com água (5+11)	64
5.7.3. Introdução da fase intermédia com ar e água (3+3+3).....	67
5.8. Comparação dos métodos de lavagem dos filtros.....	69
6. Conclusões	73
7. Desenvolvimentos futuros.....	75
8. Referências bibliográficas	77
Anexo I	83
Anexo II	85
Anexo III	87
Anexo IV	89
Anexo V	91

Índice de figuras

Figura 3.1 - Mecanismos envolvidos na filtração (a) e percentagem de remoção em função do tamanho da partícula (b) (adaptado de Binnie e Kimber, 2013)	14
Figura 3.2 - Ciclo de funcionamento de um filtro rápido (adaptado de Binnie e Kimber, 2013)..	20
Figura 3.3 - Filtros rápidos de taxa constante e nível variável (adaptado de Binnie e Kimber, 2013)	21
Figura 3.4 - Qualidade da água filtrada após a operação de lavagem (Adaptado de Tobiasson, L. et al., 2010, cap. 10).....	24
Figura 3.5 - Formação de pressão negativa no interior do filtro (adaptado de Binnie e Kimber, 2013)	25
Figura 3.6 - Relação entre consumos energéticos e volume de água captada	26
Figura 4.1 - Empresas do Grupo AdP que integram o setor do abastecimento de água e do saneamento de águas residuais (adaptado de AdP, 2016)	28
Figura 4.2 - Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água do Centro Alentejo (adaptado de AdLVT, 2016)	29
Figura 4.3 - Diagrama linear da instalação	32
Figura 4.4 - Volume de água captada, consumos energéticos e *respetiva média dos anos em estudo	36
Figura 4.5 - Distribuição dos consumos de energia elétrica	37
Figura 4.6 - Contributo do consumo energético da etapa filtração no tratamento da fase líquida	37
Figura 5.1 - Volume de água captada entre 2014 e 2016.....	39
Figura 5.2 - Valores de cota da albufeira de janeiro de 2014 a dezembro de 2016.....	40
Figura 5.3 - Temperatura da água captada e tratada ao longo do tempo	43
Figura 5.4 - Valores médios diários de turvação da água captada e tratada.....	43
Figura 5.5 - Valores médios mensais de turvação da água captada e tratada.....	44
Figura 5.6 - Relação entre os valores de cota da albufeira e os valores de turvação da água captada	45

Figura 5.7 - pH da água captada e tratada ao longo do tempo.....	45
Figura 5.8 - Dureza da água captada e tratada ao longo do tempo	46
Figura 5.9 - Alcalinidade da água captada e tratada ao longo do tempo	47
Figura 5.10 - Concentração de alumínio na água captada e tratada ao longo do tempo.....	48
Figura 5.11 - Concentração de ferro dissolvido na água captada e tratada ao longo do tempo	48
Figura 5.12 - Concentração de manganês na água captada e tratada ao longo do tempo.....	49
Figura 5.13 - Relação entre a concentração dos parâmetros, ferro, alumínio e manganês, e o valor de cota da albufeira	50
Figura 5.14 - Condutividade da água captada e tratada ao longo do tempo	50
Figura 5.15 - Oxidabilidade da água captada e tratada ao longo do tempo	51
Figura 5.16 - Valores médios diários da turvação da água captada e a montante do sistema de filtração, ao longo do tempo.....	52
Figura 5.17 - Valores médios mensais da turvação da água captada e a montante do sistema de filtração, ao longo do tempo.....	52
Figura 5.18 - Valores médios diários de turvação da água a montante e jusante do sistema de filtração, ao longo do tempo.....	53
Figura 5.19 - Valores médios mensais de turvação da água a montante e jusante do sistema de filtração, ao longo do tempo.....	53
Figura 5.20 - Eficiência de remoção de turvação nos filtros ao longo dos meses em estudo	54
Figura 5.21 - Turvação da água captada, a montante e a jusante do sistema de filtração, ao longo do tempo	54
Figura 5.22 - Eficiência de remoção de turvação, ao longo dos meses em estudo	55
Figura 5.23 - Número médio diário e mensal de lavagens dos filtros ao longo do ano de 2015	55
Figura 5.24 - Número médio diário de lavagens de cada filtro e dias que estes estiveram fora de serviço no ano de 2015	56
Figura 5.25 - Relação entre o número médio diário de lavagens dos filtros com a turvação à entrada dos filtros.....	57

Figura 5.26 - Relação entre o número médio diário de lavagens, por mês, com a turvação à entrada dos filtros.....	57
Figura 5.27 - Relação entre o volume de água captada e o número médio de diário de lavagens	58
Figura 5.28 - Turvação, em função do tempo, ao longo das fases de lavagem dos filtros com ar e água.....	58
Figura 5.29 - Turvação média durante a fase de lavagem com ar em cada um dos filtros	61
Figura 5.30 - Turvação média durante a fase de lavagem com água em cada um dos filtros ...	61
Figura 5.31 - Turvação da água à saída dos filtros 3 e 6.....	62
Figura 5.32 - Desagregação dos consumos energéticos de uma lavagem	64
Figura 5.33 - Análise da turvação à saída do filtro 3 para cada um dos métodos de lavagem ..	65
Figura 5.34 - Análise da turvação à saída do filtro 6 para cada um dos métodos de lavagem (durante os primeiros 10 minutos do ciclo de filtração).....	65
Figura 5.35 - Análise da turvação à saída do filtro 6 para cada um dos métodos de lavagem (durante as primeiras 4 horas do ciclo de filtração)	66
Figura 5.36 - Desagregação dos consumos energéticos de uma lavagem	66
Figura 5.37 - Análise da turvação da água à saída do filtro 2.....	67
Figura 5.38 - Análise da turvação da água à saída do filtro 7.....	68
Figura 5.39 - Desagregação dos consumos energéticos de uma lavagem	69
Figura 5.40 - Análise da turvação da água filtrada, nos filtros lavados com o método em vigor	70
Figura 5.41 - Análise da turvação da água filtrada, nos filtros lavados com o método (3+3+3) .	70
Figura 5.42 - Comparação entre os métodos de lavagem dos filtros, em termos de consumo de água.....	71
Figura 5.43 - Comparação entre os métodos de lavagem dos filtros, em termos de consumo energético	71
Figura 5.44 - Comparação entre os métodos de lavagem dos filtros, em termos financeiros....	72

Índice de tabelas

Tabela 3.1 - Principais operações unitárias aplicáveis a água destinada a consumo humano	9
Tabela 3.2 - Principais processos unitários aplicáveis a água destinada a consumo humano	9
Tabela 3.3 - Valores para a esfericidade de partículas com várias formas (Adaptado de Alves, 2010)	15
Tabela 3.4 - Valores para a porosidade de partículas com várias formas (Adaptado de Alves, 2010)	15
Tabela 3.5 - Valores típicos das velocidades de lavagem com ar e água em função do meio filtrante (adaptado de Cleasby e Logsdon, 1999)	23
Tabela 3.6 - Relação entre consumos energéticos e volume de água captada	26
Tabela 4.1- Principais características da AdLVT relativas ao ano de 2011 (adaptado de AdLVT, 2016)	29
Tabela 4.2- Dados do Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água do Centro Alentejo (adaptado de AdLVT, 2016).....	30
Tabela 4.3- Principais características da Albufeira de Monte Novo	30
Tabela 4.4 - Reagentes utilizados na operação da ETA de Monte Novo	34
Tabela 4.5 - Características técnicas das bombas de lavagem dos filtros	35
Tabela 4.6 - Características técnicas dos compressores de lavagem dos filtros.....	35
Tabela 4.7 - Distribuição dos consumos de energia elétrica.....	36
Tabela 5.1 - Parâmetros de análise do estado trófico da albufeira	40
Tabela 5.2 - Parâmetros de análise da água bruta	41
Tabela 5.3- Parâmetros de análise da água tratada	42
Tabela 5.4 - Potência das bombas e compressores utilizados na lavagem dos filtros	63
Tabela 5.5 - Desagregação dos consumos energéticos de uma lavagem	63
Tabela 5.6 - Potência das bombas e compressores no período de lavagem dos filtros	68
Tabela 5.7 - Desagregação dos consumos energéticos de uma lavagem	69

Lista de abreviaturas, acrónimos, siglas e símbolos

AdLVT	Águas de Lisboa e Vale do Tejo, S.A.
AdP	Águas de Portugal, SGPS, S.A.
AEA	Agencia Europeia do Ambiente
APA	Agencia Portuguesa do Ambiente
Atm	Atmosfera
AWWA	American Water Works Association
Ca	Cálcio
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio
CAP	Carvão Ativado em Pó
CEE	Comunidade Económica Europeia
Cl	Cloro
Cu	Coeficiente de uniformidade
Dam	Decâmetros
De	Diâmetro efetivo
EGF	Empresa Geral do Fomento
EPAL	Empresa Portuguesa das Águas Livres, S.A.
EPRI	Electric Power Research Institute
ETA	Estação de Tratamento de Água
FCT/UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
Fe	Ferro
FL	Fase líquida
g	Gramma
h	Hora
H ₂	Hidrogénio
H ₂ O	Água
Ha	Hectar
J	Joule
K	Potássio
L	Litro
m	Metro
min.	Minutos
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
W	Watt

N	Azoto
Na	Sódio
NaCl	Cloreto de sódio
NTU	Nephelometric Turbidity Units
O ₂	Oxigénio
P	Fósforo
pH	Potencial de Hidrogénio
RPAE	Relatório Preliminar de Auditoria Energética
SNIRH	Serviço Nacional de Informação de Recursos Hídricos
THM	Trihalometanos
EU	União Europeia
UNICEF	United Nations Children's Fund
WHO	World Health Organization
ϵ	Porosidade
L	Profundidade
ψ	Esfericidade
°C	Graus Celsius

1. Introdução

A água é um recurso natural essencial à vida e uma componente fundamental para alcançar o desenvolvimento sustentável. Este recurso responde às necessidades fundamentais do homem, sendo também um elemento chave para o progresso económico, social e cultural (UNESCO, 2009). No entanto, globalmente, cerca de 1,1 mil milhões de pessoas ainda não têm acesso a água canalizada (WHO e UNICEF, 2000).

Este recurso é utilizado para diversas finalidades pelo Homem, assumindo maior importância o abastecimento público, mas também os usos agrícolas e industriais e a produção de energia elétrica. Estima-se que anualmente são necessários cerca de 250 m³ de água por pessoa para satisfazer as necessidades humanas básicas (Alves, 2010; Degrémont Suez, 2007).

Apesar do volume de água na Terra não ter sofrido uma grande variação ao longo dos últimos anos e apenas cerca de um quinto dos recursos hídricos disponíveis serem utilizados, os problemas subsistem porque a água não se encontra equitativamente distribuída e, também, porque a sua qualidade se tem vindo a deteriorar (Nixon, Lack e Hunt, 2000).

O crescente conhecimento científico e a alteração dos padrões sociais suscitam, nos dias de hoje, a emergência de novos desafios no que respeita à qualidade da água destinada ao consumo humano. Atualmente, as preocupações com o tratamento de água deixaram de ser apenas a qualidade microbiológica e passaram a englobar também a qualidade química da água.

Apesar disto, a sociedade tem vindo a experimentar alterações significativas nos seus padrões e níveis de vida, ao que se tem associado mudanças de determinados valores. É o caso paradigmático do reconhecimento da água como um valor ecológico e social e da consciencialização para com a problemática das alterações climáticas (Vieira, 2003). Na verdade, os esforços da União Europeia para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa estão a ter resultados satisfatórios, prevendo-se que a UE cumpra o objetivo, unilateralmente adotado, de 20% de redução (em relação aos níveis de 1990) antes de 2020 (AEA, 2015).

O aumento das exigências com a qualidade da água, associado às preocupações com as alterações climáticas e a própria conjuntura económica atual exigiu, por parte das empresas do setor da água, uma reflexão neste sentido, iniciando-se um processo de otimização dos sistemas de tratamento e abastecimento de água.

De acordo com Plappally e Lienhard (2011) cerca de 7% da energia elétrica produzida mundialmente é gasta no tratamento e distribuição de água para consumo humano bem como no tratamento de águas residuais. Da energia consumida no processo de abastecimento de água, a bombagem é o fator mais relevante seguindo-se as etapas de tratamento da fase líquida, na qual se inclui a operação de filtração.

Conceber um sistema de tratamento de água para consumo humano é uma tarefa complexa que depende dos objetivos de qualidade definidos e das características da água a tratar, acabando

por se materializar num conjunto de etapas que se interligam (Alves, 2005). A filtração é uma operação unitária fundamental no processo de tratamento de água e tem como principal objetivo remover a matéria em suspensão que não tenha sido eliminada nas fases de tratamento a montante (Cheremisinoff, 2002).

Ao longo de um ciclo de filtração, o leito filtrante vai ficando colmatado, sendo assim necessário proceder à sua lavagem. A forma mais eficaz realizar esta operação consiste em inverter o fluxo de escoamento da água tratada, permitindo que esta volte a passar pelo meio filtrante (lavagem em contracorrente), sendo também frequente a utilização de ar comprimido por forma a tornar esta operação mais eficiente (Satterfield, 2005; Logsdon, 2008).

A operação de lavagem dos filtros com ar e água em contracorrente é efetuada com recurso a grupos de bombas e supressores. Esta operação acaba por ter um peso relevante nas faturas energéticas das instalações e requerer um volume de água considerável.

O presente trabalho, tem assim como principal objetivo, procurar contribuir para a otimização da operação de filtração da Estação de Tratamento de Água de Monte Novo e desta forma reduzir o consumo energético da instalação, bem como o volume de água gasto durante a operação de lavagem dos filtros.

2. Organização da dissertação

A presente dissertação está dividida em sete capítulos e cinco anexos, tendo as referências bibliográficas sido suportadas por livros, artigos científicos e dissertações de Mestrado e Doutoramento.

O primeiro capítulo é introdutório, apresentando a problemática que serve de base para o desenvolvimento do estudo, bem como o seu principal objetivo.

No terceiro capítulo é apresentado o enquadramento teórico subjacente ao desenvolvimento da presente dissertação. O quarto apresenta a metodologia adotada, bem como o caso de estudo.

Os quinto e sexto capítulos apresentam a discussão geral de resultados e as principais conclusões. O sétimo capítulo resume os desenvolvimentos futuros que se consideram poder ser relevantes para o avanço nesta matéria.

3. Revisão bibliográfica

3.1. Qualidade da água

O acesso da população a água potável é um direito humano básico que, contudo, ainda não é uma realidade para cerca de 1,1 mil milhões de pessoas em todo o mundo. As doenças causadas pela insuficiência de água potável, simultaneamente com a falta de saneamento e higiene, provocam cerca de 3,4 milhões de mortes por ano, principalmente crianças (UNICEF, 2008). Um estudo conjunto entre a WHO e a UNICEF, *Progress on Sanitation and Drinking Water – 2015 update and MDG assessment*, refere que cerca de 663 milhões de pessoas em todo o mundo, especialmente em África, não viram melhoradas as suas condições de abastecimento de água nos últimos 25 anos.

De acordo com UNICEF (2008), e usando a classificação segundo Bradley, as doenças relacionadas com a água podem classificar-se em quatro grupos, com base em considerações epidemiológicas:

- Doenças que se transmitem através da ingestão de água contaminada por organismos patogénicos (*Waterborne diseases*). Entre as doenças que tipicamente se incluem neste grupo estão a cólera, a febre tifoide, a hepatite, as diarreias e as gastroenterites.
- Patologias que se disseminam pela falta de higiene e saneamento (*Water-washed diseases*). Este tipo de doenças estão mais relacionadas com a falta de água em quantidade do que em qualidade. Como doenças representativas, destaca-se o tracoma e a sarna.
- Infecções causadas por parasitas patogénicos que se encontram na água (*Water-based diseases*), como por exemplo a bilhárzia ou a dracunculose.
- Doenças causadas por insetos que são o vetor da patologia e que se reproduzem geralmente perto de água estagnada (*Water-related diseases*). A malária, o dengue ou a febre-amarela são exemplos deste tipo de doenças.

Apesar das doenças causadas por contaminação química poderem ser classificadas à parte destes quatro grupos, geralmente são incluídas no grupo das *Waterborne diseases*, estando este tipo de doenças relacionadas com a exposição prolongada a água contaminada.

Dependendo de cada uso, os aspetos qualitativos dos recursos hídricos têm diferentes exigências, principalmente quando se destinam ao consumo humano. A evolução dos conhecimentos técnico-científicos e o crescente conhecimento dos efeitos da qualidade da água na saúde humana tornam estas preocupações ainda mais relevantes.

O Relatório do Estado do Ambiente 2015 (APA, 2015) salienta que em Portugal a qualidade da água para consumo humano tem vindo a registar, ano após ano, melhorias constantes e sustentadas, alcançando em 2014 o valor de 98,41% de água segura na torneira do consumidor. Este relatório refere ainda que foram realizadas praticamente todas as análises impostas pela

legislação o que traduz um controlo exigente, muito próximo do cumprimento integral deste requisito legal.

A origem da água tem associado um conjunto de características, que refletem a sua interação com o meio ambiente, influenciando de forma substancial a sua qualidade.

A captação de águas superficiais está normalmente associada a lagos (albufeiras) e, ou rios. A qualidade da água proveniente de um lago ou de uma albufeira não é, na generalidade, tão consistente como a qualidade da água proveniente de uma captação subterrânea mas é, no entanto, mais consistente que a qualidade da água proveniente de um rio, pois neste, o índice turvação varia rapidamente com a precipitação e com as escorrências que normalmente lhe estão associadas. Num lago ou numa albufeira a qualidade difere com as correntes geradas pelo vento ou aquando da estratificação térmica.

A captação de água de origem subterrânea, quando disponível em quantidade suficiente, é normalmente a fonte de água preferida, apresentando uma qualidade uniforme, ausência de cor, quantidades reduzidas de matéria orgânica e uma melhor qualidade bacteriológica. Contudo, algumas águas subterrâneas podem apresentar-se altamente mineralizadas, com teores significativos de Fe, Mn, sulfatos, cloretos, Ca e Mg, o que pode encarecer substancialmente o seu tratamento. A presença de Fe em águas subterrâneas faz com que, normalmente, aquelas águas apresentem cor.

A extensão da remoção, quer de matéria em suspensão, quer de microrganismos, depende da profundidade a que se encontra o aquífero e das características do material sobrejacente. A qualidade bacteriológica da água aumenta normalmente com o tempo de armazenamento no aquífero, pois as condições de armazenamento não favorecem a sobrevivência e a multiplicação dos microrganismos (Mano, 2016).

Até ao início do século XX, a qualidade de uma água para abastecimento público era avaliada qualitativamente de acordo com o senso comum. Devia apresentar-se límpida, ter sabor agradável e não ter cheiro. Hoje em dia, a qualidade da água é avaliada por um conjunto de parâmetros que devem respeitar as normas em vigor. Estas normas constituem a expressão quantitativa das características mínimas necessárias para determinada água ser destinada ao abastecimento. Estes critérios de qualidade são definidos tendo em consideração que a água não pode conter organismos patogénicos nem substâncias químicas em concentrações consideradas perigosas para a saúde. A água também deve ter uma aparência límpida, ser incolor e inodora, entre outras características, para que os consumidores não questionem a sua própria segurança. Também é fundamental que a água seja equilibrada, de forma a limitar a deterioração das condutas do sistema de abastecimento (Alves, 2010).

Do ponto de vista técnico, a identificação de substâncias, por vezes em quantidades vestigiais, representa um problema cuja resolução nem sempre é evidente e que por vezes não tem o rigor desejável. Das muitas substâncias cuja presença na água é reconhecida, escasseiam os dados ecotoxicológicos que poderiam identificar os efeitos nos organismo-alvo. Assim, estamos perante

um conjunto de substâncias que desconhecemos, que não sabemos identificar de forma sistemática e rotineira e cujos efeitos diretos ou indiretos não foram ainda estudados de forma eficaz (Mendes, B. e Oliveira, J. F., 2004).

Para a análise da qualidade da água é possível agrupar o conjunto de parâmetros em três grupos, parâmetros microbiológicos, químicos e indicadores:

- Parâmetros microbiológicos são indicadores de contaminação por microrganismos e têm como objetivo a deteção de organismos patogénicos;
- Parâmetros químicos refletem a presença de substâncias de elevada toxicidade e que podem representar uma ameaça significativa para a saúde pública;
- Parâmetros indicadores têm como objetivo o bom funcionamento dos sistemas de tratamento de água e não representam, em situações normais, riscos para a saúde pública.

3.2. Enquadramento legal

Para satisfazer a procura, o Homem recorre às reservas naturais que apresentam água de melhor qualidade. No entanto, a água tem a capacidade de dissolver diversas substâncias e transportar matéria em suspensão podendo tornar-se um vetor transmissor de doenças.

Estas substâncias devem ser removidas ou mantidas dentro de certos limites para que a água possa ser destinada ao consumo público (Alves, 2010). Como a água não pode ser apreciada diretamente é necessário analisar um conjunto de parâmetros regulamentados por lei.

Em Portugal, as normas de qualidade da água para consumo humano são regidas essencialmente pelo Decreto-Lei 236/98, de 1 de agosto. O presente diploma revogou o Decreto-Lei nº 74/90, transpondo para o direito nacional a Diretiva 80/778/CEE, de 15 de julho, relativa à qualidade das águas destinadas ao consumo humano, estabelecendo normas, critérios e objetivos de qualidade com a finalidade de proteger o meio aquático e melhorar a qualidade das águas em função dos seus principais usos.

Este diploma define no seu capítulo II os requisitos a observar na utilização das águas para consumo humano, bem como uma classificação em categorias A1, A2 e A3, de acordo com as normas de qualidade fixadas, fazendo corresponder a esta classificação um esquema de tratamento distinto. Este decreto-lei fixa também uma frequência mínima de amostragem e análise para a monitorização da qualidade, consoante a classificação das águas doces superficiais destinadas à produção de água para consumo humano.

Com base no disposto neste diploma, são consideradas aptas para poderem ser utilizadas como origem de água para a produção de água para consumo humano, as águas subterrâneas que apresentem qualidade superior ou igual à da Categoria A1 das águas doces superficiais quando utilizadas para o mesmo fim.

A secção III, águas de abastecimento para consumo humano, do capítulo II iria sofrer retificações, tornando as normas de qualidade mais rigorosas através da diretiva 98/83/CE, transposta para o direito nacional pelo Decreto-Lei nº 243/2001. No entanto a atual legislação vigente, relativa à qualidade das águas superficiais destinadas ao consumo humano encontra-se regulamentada pelo Decreto-Lei nº 306/2007, de 27 de Agosto, que entrou em vigor a 1 de janeiro de 2008 e procede à revisão do Decreto-Lei nº 243/2001, de 5 de setembro.

O Decreto-Lei nº 306/2007 define o intervalo de valores admitidos dos parâmetros constantes das partes I, II e III do anexo I. Refere igualmente que a água distribuída deve ser submetida a um processo de desinfecção e que compete às entidades gestoras assegurar a eficácia da desinfecção e garantir, sem comprometer a desinfecção, que a contaminação por subprodutos da água seja mantida a um nível tão baixo quanto possível e não ponha em causa a sua qualidade para consumo humano. Compete igualmente às entidades gestoras garantir que a água destinada ao consumo humano seja salubre, limpa e desejavelmente equilibrada (Mano, 2016).

A Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos (ERSAR) é responsável pela coordenação da implementação deste diploma e tem como principal objetivo a proteção dos interesses dos utilizadores, através da promoção da qualidade de serviço prestado pelas entidades gestoras e da garantia de tarifários socialmente aceitáveis, materializada nos princípios de essencialidade, indispensabilidade, universalidade, equidade, fiabilidade e de custo-eficácia associada à qualidade de serviço.

3.3. Tratamento de água para consumo humano

A conceção de linhas de tratamento de água para consumo humano é uma tarefa complexa já que depende dos objetivos de qualidade definidos, das características da água a tratar, de condições físicas e económicas, da flexibilização do tratamento com vista a alterações futuras e, ainda, das características do sistema de distribuição. O sistema de tratamento materializa-se assim num conjunto de etapas que se interligam. Cada etapa de tratamento pode ser classificada em operação unitária ou em processo unitário, sendo os processos unitários suportados por reações químicas ou biológicas, enquanto as operações unitárias são suportadas por princípios físicos (Alves, 2005; Brito, Oliveira e Peixoto, 2014).

As principais operações e processos unitários encontram-se resumidos nas tabelas seguintes. Contudo, existe ainda um vasto conjunto de tipos de tratamentos, isto é, conjugação de operações e processos, que podem ser efetuados em determinadas situações específicas.

Tabela 3.1 - Principais operações unitárias aplicáveis a água destinada a consumo humano (Adaptado de Alves, 2005)

Operações Unitárias	Função
Gradagem	Separação de impurezas grosseiras
Arejamento	Remoção de voláteis e precipitação de metais
Floculação	Aglutinação de partículas em suspensão
Sedimentação	Remoção de partículas em suspensão
Filtração	Remoção de partículas finas após sedimentação
Adsorção	Remoção de substâncias dissolvidas
Armazenamento	Conservação da água tratadas antes da distribuição

Tabela 3.2 - Principais processos unitários aplicáveis a água destinada a consumo humano (Adaptado de Alves, 2005)

Processos unitários	Função
Coagulação	Destabilização de partículas coloidais
Estabilização	Correção de pH, alcalinidade e teor de cálcio
Desinfecção	Remoção de microrganismos patogênicos

3.4. Principais etapas de tratamento utilizadas em água para abastecimento

3.4.1. Coagulação-Floculação

O principal objetivo de um processo de coagulação-floculação é a remoção de partículas em suspensão. Bratby (2006) refere o termo coagulação como sendo o mecanismo de destabilização dos coloides e a floculação como sendo a operação que promove a aglomeração das partículas em flocos por forma a facilitar a sua remoção.

De acordo com Alves (2010) para quebrar a estabilidade das partículas coloidais podem considerar-se vários mecanismos físico-químicos:

- Compressão da dupla camada;
- Adsorção e neutralização de carga;
- Aprisionamento das partículas num precipitado;
- Adsorção e formação de pontes entre partículas.

A destabilização das partículas é promovida pela adição de um agente coagulante que pode ser de natureza inorgânica, caso dos sais metálicos, ou orgânica, como os polieletrólitos.

Existem vários fatores que afetam a eficiência da coagulação, sendo estes a quantidade de material particulado, a quantidade e natureza da matéria orgânica e as propriedades químicas e físicas da água. Estes parâmetros são fundamentais para estabelecer as condições de coagulação apropriadas. O tipo de coagulante, a sua dosagem e o pH são também elementos condicionantes neste processo (Bratby, 2006).

A seleção do tipo e da dose de coagulante é normalmente efetuada com recurso a ensaios experimentais, dos quais o *jar test* é o mais comum. Este ensaio consiste em expor um conjunto de amostras a uma variedade controlada de condições de tratamento avaliando posteriormente as que materializam melhores resultados. Estas condições devem ser ajustadas em função da qualidade da água bruta a cada momento, uma vez que variações podem comprometer o processo de coagulação e, conseqüentemente, a qualidade da água no final do tratamento.

O sucesso do processo de coagulação depende ainda da dispersão rápida e uniforme do agente coagulante. Esta dispersão pode ser realizada recorrendo a equipamento hidráulico ou mecânico, sendo os parâmetros utilizados na avaliação de funcionamento o gradiente de velocidade e o tempo de reação (Binnie e Kimber, 2013).

A floculação é a operação unitária que surge na sequência da coagulação e tem por objetivo facilitar o contacto das partículas previamente destabilizadas, por forma a poderem ser separadas quer por sedimentação quer por flotação. Esta operação é o principal mecanismo de remoção de turvação de água e ao contrário da coagulação exige gradientes de velocidades reduzidos. Normalmente são utilizados agitadores axiais e câmaras com anteparas, operando com gradientes de velocidade decrescentes nos diversos compartimentos do floculador (Spellman, 2012; Brito *et al.*, 2014).

Os floculantes ou adjuvantes da coagulação são reagentes destinados a favorecer cada uma destas operações, podendo otimizar a velocidade de reação, mas também aumentar e melhorar a qualidade do floco. Estes reagentes podem classificar-se de acordo com a sua natureza, em minerais ou orgânicos, de acordo com a sua origem, em sintéticos ou naturais e ainda consoante a sua carga elétrica, em aniônicos, catiónicos ou não aniônicos (Alves, 2010).

3.4.2. Decantação

Esta operação unitária tem como principal objetivo a remoção de sólidos sedimentáveis por gravidade e, num sistema de tratamento convencional, situa-se normalmente após a floculação e a montante da filtração. As operações de decantação processam-se, na sua grande maioria, em tanques retangulares ou circulares e podem ser de fluxo horizontal ou vertical (Spellman & Drinan, 2012).

De acordo com o tipo de partículas em suspensão, é possível distinguir quatro tipos de sedimentação (Gregory, Zabel e Edzwald, 1999, cap. 7):

- Tipo I - Sedimentação de partículas discretas: Situação em que não existe interação entre as partículas e a velocidade de sedimentação e é independente da sua concentração.
- Tipo II – Sedimentação de partículas floculantes: Quando se verifica alteração das propriedades das partículas, observando-se coalescências das mesmas, aumentando a sua massa e conseqüentemente a sua velocidade de sedimentação.

- Tipo III – Sedimentação retardada: Quando devido ao aumento da concentração de partículas existe uma diminuição gradual da velocidade de sedimentação. Desta forma é criado um agregado denso de partículas que sedimentam como um todo, verificando-se a ocorrência de uma interface entre a água clarificada e os flocos.
- Tipo IV – Sedimentação em compressão: Ocorre quando a concentração de partículas é de tal modo elevada que a sedimentação é promovida pelo peso das partículas que se vão depositando.

Em tratamento de água para consumo humano, os três primeiros tipos de sedimentação são os mais relevantes.

A sedimentação poderá ser afetada por um conjunto de fatores que inclui o tamanho, a forma e massa volúmica das partículas, bem como as propriedades físicas da água. O tempo de retenção, assim como a carga hidráulica superficial são os dois parâmetros operacionais mais importantes para o bom desempenho deste processo (Alves, 2010).

De mencionar que é comum conceber-se soluções de decantação compactas em que são instalados módulos lamelares como o objetivo de aumentar a área de decantação, passando esta operação a ser designada por decantação acelerada.

3.4.3. Filtração

A filtração é uma operação unitária fundamental no processo de tratamento de água e tem como principal objetivo remover a matéria em suspensão que não tenha sido eliminada nas fases de tratamento a montante. Além da matéria em suspensão a filtração também permite remover matéria orgânica natural, alguns microrganismos e ainda os precipitados de ferro ou manganês decorrentes do processo de coagulação (Cleasby e Logsdon, 1999, cap. 8; Cheremisinoff, 2002).

Na sequência das operações e processos unitários que constituem um sistema de tratamento, a filtração surge, geralmente, a jusante da sedimentação. Contudo, em certos casos pode ser utilizada como operação de remoção primária da turvação, ou seja, pode ser destinada à filtração direta da água a tratar (Spellman, 2012; Alves, 2005).

Consideram-se dois métodos base nesta operação, a filtração sobre suporte e a filtração em leito granular, que será alvo de uma análise mais pormenorizada na secção seguinte.

A filtração sobre suporte utiliza como meio filtrante uma camada porosa muito fina que é substituída no início de cada lavagem. A filtração em leito granular é a mais comum e o seu meio de enchimento é normalmente constituído por camadas de areia, antracite ou carvão ativado. Podem ainda ser utilizados meios mistos apesar de terem uma aplicação mais restrita (Cleasby e Logsdon, 1999, cap. 8; Brito *et al.*, 2014).

A classificação dos filtros pode ser efetuada em função do sentido do fluxo da água durante a operação de filtração (fluxo ascendente e fluxo descendente), do método de controlo de caudal

(filtros sob pressão ou filtros gravíticos), e da taxa filtração (filtros rápidos ou lentos) entre outras variáveis (Cleasby e Logsdon, 1999, cap. 8)

Durante o ciclo de filtração, os filtros vão ficando colmatados, fenómeno que se materializa no aumento da perda de carga. Quando os filtros atingem o seu valor de colmatação máxima, entram em ciclo de lavagem, processo que, no caso dos filtros rápidos, se inicia com o isolamento do filtro, seguido da aplicação de um fluxo de água e ar em simultâneo ou separadamente, no sentido contrário ao da filtração (contracorrente) de forma a promover uma expansão do meio filtrante (Almeida, 2005).

3.4.4. Desinfeção

A desinfeção é o processo de tratamento mais importante a que a água deve ser sujeita. Este processo tem como objetivo reduzir o número de organismos patogénicos porém, nem todos são destruídos, o que distingue este processo do processo de esterilização (Haas, 1999).

Existem três tipos de microrganismos patogénicos que são motivo de maior preocupação no tratamento de água: vírus, bactérias e protozoários. Os vírus são parasitas obrigatórios responsáveis por doenças como a poliomielite, hepatite e a constipação comum. As bactérias e protozoários são organismos unicelulares que utilizam a matéria orgânica como fonte de energia. Exemplos de bactérias de interesse no tratamento da água incluem a *Salmonella Typhi*, que provoca a febre tifoide, e a *Escherichia coli* que é o principal indicador de contaminação fecal da água. Os protozoários de interesse incluem o *Cryptosporidium parvum* e *Giardia Lamblia* (Binnie e Kimber, 2013).

De acordo com Alves 2010, a desinfeção é realizada com recurso a agentes físicos, tais como, o calor, a luz solar e a radiação ultravioleta, ou através de agentes químicos, como o cloro, dióxido de cloro, cloraminas e ozono. Um agente desinfetante deve apresentar as seguintes características:

- Ser tóxico para os microrganismos em baixas concentrações;
- Não ser tóxico para os seres humanos e animais;
- Ser solúvel em água;
- Ser eficaz às temperaturas normais da água de consumo;
- Ser estável, permitindo a manutenção de concentrações residuais durante longos períodos de tempo;
- Não reagir com outra matéria orgânica que não seja a dos microrganismos;
- Não ser agressivo a metais ou vestuário;
- Existir em quantidades suficientes e a um preço acessível;
- Ser fácil de manipular;
- Permitir um controlo fácil das suas concentrações.

Deve-se ter em conta alguns fatores na escolha do agente desinfetante, como o tempo de contacto, a intensidade e natureza do agente, a temperatura, o número e o género de organismos

a remover. Outra característica importante é a formação de residual, por forma a garantir a desinfecção da água ao longo da rede de distribuição.

O método mais comum no processo de desinfecção é o doseamento de cloro. O cloro é um agente desinfetante economicamente acessível, eficiente na inativação de um grande número de organismos patogénicos e capaz de assegurar a manutenção de uma concentração residual ao longo dos circuitos hidráulicos, sendo este facilmente mensurável e controlável. No entanto, o cloro pode reagir com substâncias orgânicas e inorgânicas naturalmente presentes na água, originando subprodutos da desinfecção indesejáveis, como os trihalometanos (THM) (Babbitt, 1962).

3.5. Filtração em leito granular

3.5.1. Teoria da filtração em leito granular

A filtração em leito granular ou filtração profunda é um método de filtração que tem como base o escoamento da água através de um leito de material granulado, que retém a matéria sólida ao mesmo tempo que permite a passagem da água (Binnie e Kimber, 2013).

Como já referido, os filtros podem ser classificados de acordo com várias características, todavia, existem três tipos básicos de filtros em leito granular: filtros lentos, filtros rápidos e filtros em pressão.

Os meios de enchimento mais comuns são a areia, sílica, antracite e carvão ativado, podendo também ser utilizados meios mistos apesar de terem uma aplicação mais restrita (Cleasby e Logsdon, 1999, cap. 8).

O principal mecanismo envolvido na filtração é a remoção mecânica, em que as partículas de dimensões superiores às dos poros dos filtros são removidas do meio líquido. Contudo, existem outros mecanismos como a intercepção, sedimentação, difusão, adsorção e ainda o crescimento de atividade biológica que podem ser fundamentais nesta operação, principalmente quando se trata de partículas inferiores a 1 μm , como representado na Figura 3.1 (Binnie e Kimber, 2013; AWWA, 2011).

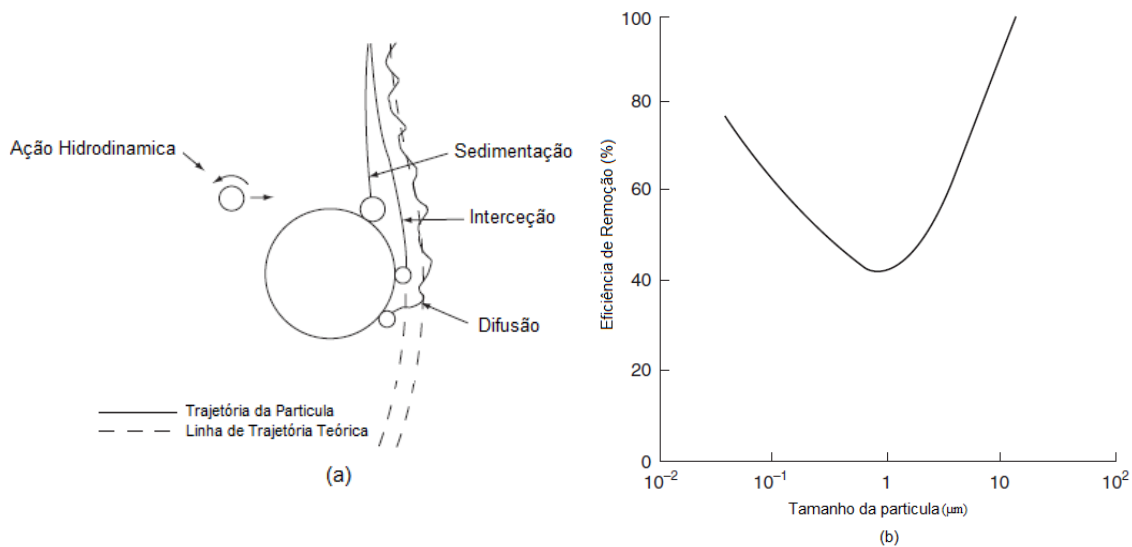


Figura 3.1 - Mecanismos envolvidos na filtração (a) e percentagem de remoção em função do tamanho da partícula (b) (adaptado de Binnie e Kimber, 2013)

O material do meio filtrante bem como as suas características granulométricas têm grande influência no sucesso desta operação. De acordo com Alves (2010) o tamanho dos grãos e a sua distribuição granulométrica são definidos através de ensaios de onde se obtêm curvas de distribuição que permitem caracterizar o meio filtrante através de indicadores como o diâmetro efetivo (D_E), coeficiente de uniformidade (C_U), esfericidade (ψ) e porosidade (ϵ).

O diâmetro efetivo (D_E), corresponde à dimensão da malha do peneiro que permite a passagem de 10% da massa do meio filtrante. Ou seja,

Equação 3.1

$$D_e = P_{10}$$

O coeficiente de uniformidade (C_U) é o quociente entre a dimensão da malha do peneiro que permite a passagem de 60% da massa do material filtrante e a dimensão da malha do peneiro que permite a passagem de 10% da massa do material filtrante. Ou seja,

Equação 3.2

$$C_u = \frac{P_{60}}{P_{10}}$$

A esfericidade é uma medida da forma de uma partícula, sendo definida pela razão entre a área superficial de uma esfera de volume equivalente ao da partícula (A_e) e a área superficial da partícula (A_p), (Tabela 3.3):

Equação 3.3

$$\psi = \frac{A_e}{A_p}$$

Tabela 3.3 - Valores para a esfericidade de partículas com várias formas (Adaptado de Alves, 2010)

Forma	Esférica	Arredondada	Angular	Partida
Esfericidade (ψ)	1,00	0,95	0,75	0,65

A porosidade (ϵ) define-se com a razão entre o volume de espaços vazios (V_v) e o volume total (V_t) do material filtrante (Tabela 3.4):

Equação 3.4

$$\epsilon = \frac{V_v}{V_t}$$

Tabela 3.4 - Valores para a porosidade de partículas com várias formas (Adaptado de Alves, 2010)

Forma	Esférica	Arredondada	Angular	Partida
Porosidade (ϵ)	0,38	0,39	0,43	0,48

Estas características do meio filtrante são relevantes não só para a eficiência de filtração mas também para condições da lavagem em contracorrente e para os valores de perda de carga do filtro (Cleasby e Logsdon, 1999, cap. 8; Stevenson, 1997).

Durante o ciclo de filtração, os filtros vão ficando colmatados, fenómeno que se materializa no aumento da perda de carga. A perda de carga é uma função complexa do caudal, pressão, concentração de sólidos e das características do meio filtrante. Também a viscosidade da água, que está diretamente relacionada com a temperatura tem uma grande preponderância nos valores de perda de carga (Logsdon, 2008; Bratby, 2006).

De acordo com Alves (2010), o cálculo da perda de carga num filtro uniforme consegue-se por adaptação da equação de Darcy-Weisback, aplicável ao escoamento numa conduta sob pressão:

Equação 3.5

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

Onde,

h_L = queda de pressão;

L = comprimento do tubo;

f = coeficiente de atrito;

D = diâmetro do tubo;

v = velocidade de escoamento;

g = aceleração da gravidade.

Como num leito filtrante não é possível definir o diâmetro, é necessário substituir este parâmetro por um termo que é função do raio hidráulico, neste caso de uma secção circular:

Equação 3.6

$$R = \frac{\pi D^2}{4\pi D} = \frac{D}{4}$$

Substituindo na equação de Darcy-Weisback,

Equação 3.7

$$h_L = f \frac{Lv^2}{8gR}$$

Sendo que se trata de um filtro é necessário adaptar o raio hidráulico, multiplicando ambos os termos da fração pelo mesmo comprimento, mantendo as dimensões do raio hidráulico,

Equação 3.8

$$R = \frac{\text{Área molhada}}{\text{Perímetro molhado}} = \frac{\text{Volume de líquido}}{\text{Área total das partículas}}$$

Assim é possível relacionar o raio hidráulico com as características do meio filtrante. Considerando N como o número de partículas, “ a ” e “ b ” a área e o volume de uma partícula e A_s e B_s a área e o volume total das partículas,

Equação 3.9

$$B_s = Nb$$

Equação 3.10

$$A_s = Na$$

Deste modo, é possível calcular o volume disponível para o fluido através da porosidade, ϵ ,

Equação 3.11

$$\epsilon = \frac{\text{volume de vazios}}{\text{volume do filtro}}$$

Equação 3.12

$$1 - \epsilon = \frac{\text{volume de partículas}}{\text{volume do filtro}}$$

Sendo o volume total do filtro, V_t ,

Equação 3.13

$$V_T = \frac{Nb}{1 - \epsilon}$$

E o volume de vazios, V_v ,

Equação 3.14

$$V_v = \frac{eNb}{1-e}$$

Substituindo na expressão do raio hidráulico,

Equação 3.15

$$R = \frac{\frac{eNb}{1-e}}{Na} = \left(\frac{e}{1-e}\right) \frac{Nb}{Na} = \left(\frac{e}{1-e}\right) \frac{B_s}{A_s}$$

Quando o meio filtrante é composto por partículas esféricas de diâmetro regular, d ,

Equação 3.16

$$b = \frac{\pi d^3}{6}$$

Equação 3.17

$$a = \pi d^2$$

Assim:

Equação 3.18

$$\frac{b}{a} = \frac{d}{6}$$

No entanto, quando o meio filtrante não é composto por partículas esféricas considera-se um fator adimensional de acordo com a esfericidade, ψ :

Equação 3.19

$$\frac{b}{a} = \frac{B_s}{A_s} = \psi \frac{d}{6}$$

Substituindo pelo R , vem então,

Equação 3.20

$$R = \frac{e}{1-e} \psi \frac{d}{6}$$

Tendo em conta que a velocidade superficial v_s , corresponde à taxa de filtração ou carga hidráulica (U) e a velocidade média nos poros, v , é o quociente entre a carga superficial e a porosidade:

Equação 3.21

$$v_s = \frac{Q}{A_s} = U$$

Equação 3.22

$$v = \frac{v_s}{e} = \frac{U}{e}$$

Acabando por se obter a equação conhecida por Carman-Kozeny,

Equação 3.23

$$h_L = f_1 \frac{L}{\psi D} \frac{1 - e}{e^3} \frac{U^2}{g}$$

Em que f_1 pode ser obtido pela expressão empírica seguinte:

Equação 3.24

$$f_1 = 150 \frac{1 - e}{R_e} + 1,75$$

Sendo R_e o número de Reynolds,

Equação 3.25

$$R_e = \frac{\psi \rho_a v_s d}{\mu} = \frac{\psi U d}{\nu}$$

Com,

ψ = esfericidade;

ρ_a = massa volúmica da água;

v_s = velocidade superficial ou carga hidráulica;

d = diâmetro dos grãos;

μ = viscosidade dinâmica;

ν = viscosidade cinemática.

As perdas de carga por unidade de altura do leito filtrante para meio homogêneo são calculadas substituindo na equação 3.23 o diâmetro das partículas pela equação 3.19.

Equação 3.26

$$\frac{h_L}{L} = \frac{f_1}{6} \frac{1 - e}{e^3} \frac{U^2}{g} \left(\frac{A_s}{B_s} \right)$$

Em que,

Equação 3.27

$$\frac{A_s}{B_s} = \int_{x=0}^{x=1} \frac{dx}{d}$$

Através de ensaios laboratoriais que permitem determinar as características granulométricas do meio filtrante pode escrever-se:

Equação 3.28

$$\frac{A_s}{B_s} = \frac{6}{\psi} \sum \frac{x}{d^*}$$

Onde,

x = fração mássica de partículas retidas entre dois peneiros consecutivos;

d^* = diâmetro geométrico médio das malhas dos mesmos dois peneiros.

Por forma a calcular as perdas de carga de um meio filtrante estratificado é necessário adaptar a equação de Carman-Kozeny:

Equação 3.29

$$\frac{dh_L}{dL} = \frac{1}{\psi} \frac{L}{D} \frac{1-e}{e^3} \frac{U^2}{g} \frac{f_1}{d}$$

Através de uma análise granulométrica, é possível separar um meio filtrante não uniforme em frações mássicas, x_i , de partículas de diâmetro nominal d_i ,

Equação 3.30

$$\sum x_i = 1,0$$

Assumindo a porosidade como constante, a altura do leito, l_i , associada a partículas de diâmetro d_i ,

Equação 3.31

$$l_i = x_i L$$

A perda de carga em cada segmento do leito, h_{Li} , é variável, já que as partículas possuem dimensões diferentes. Pelo mesmo motivo, o fator de fração também varia consoante o segmento de leito. Assim,

Equação 3.32

$$h_L = \int_0^L dh_L = \frac{1}{\psi} \frac{L}{D} \frac{1-e}{e^3} \frac{U^2}{g} \frac{f_1}{d} dL$$

Sendo a perda de carga em todo o leito dada por,

Equação 3.33

$$\sum h_{Li} = h_L = KL \sum \frac{x}{d^*}$$

Onde,

Equação 3.34

$$K = \frac{1}{\psi} \frac{L}{D} \frac{1-e}{e^3} \frac{U^2}{g}$$

Quando os filtros ficam colmatados, atingindo o valor de perda de carga para o qual foram projetados, ou quando a água filtrada começa a apresentar valores de turvação elevados, dá-se

início ao ciclo de lavagem (Figura 3.2). Este processo inicia-se com o isolamento do filtro, seguido da aplicação de um fluxo de água ou ar e água no sentido contrário ao da filtração (contracorrente) de forma a promover uma expansão do meio filtrante (Almeida, 2005).

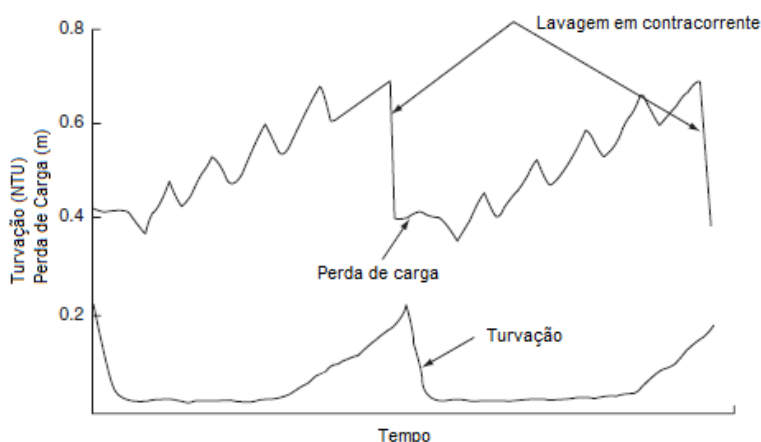


Figura 3.2 - Ciclo de funcionamento de um filtro rápido (adaptado de Binnie e Kimber, 2013)

3.5.2. Filtros rápidos de areia a caudal constante e nível variável

A filtração rápida é o tipo de filtração mais comum apesar de necessitar de um controlo de operação complexo e de uma supervisão qualificada para obter resultados satisfatórios (Nemerow, Agardy, Sullivan e Salvato, 2009).

Os principais elementos de um filtro são a base, a camada de suporte, o leito filtrante e as caleiras destinadas à recolha da água de lavagem (Alves, 2010).

As características do leito filtrante, neste caso areia, são um aspeto essencial no dimensionamento de um filtro rápido e são escolhidas de acordo com os objetivos de tratamento previamente estabelecidos. De um modo geral, a areia utilizada é siliciosa, relativamente grosseira, apresentando um diâmetro efetivo entre 0,5 e 6,0 mm e um coeficiente de uniformidade de cerca de 1,2 (AWWA, 2011). De acordo com Kawamura (1999) a profundidade (L) adequada para um filtro está diretamente relacionada com o diâmetro efetivo (D_E) do meio filtrante devendo ser L/D_E superior a 1,000.

O leito filtrante é colocado sobre uma camada de suporte que pode ser composta por gravilha ou cascalho. Esta camada deve ser disposta de forma estratificada, sendo o material mais fino colocado no topo e o mais grosseiro na base. A camada de suporte também deve ter capacidade para reter todo o material filtrante impedindo-o de atingir os drenos de saída.

A base ou sistema de drenagem é o elemento do filtro que separa o leito filtrante da água filtrada. Este elemento tem que suportar todo o peso da água acima do meio filtrante, recolher a água filtrada e distribuir o ar e água da lavagem em contracorrente de forma uniforme (Binnie e Kimber, 2013; Alves, 2010).

Os filtros rápidos operam com taxas de filtração elevadas, regulada pela descarga dos drenos uma vez que se tratam de sistemas gravíticos. Binnie e Kimber (2013) referem que a taxa de filtração típica dos filtros rápidos de areia varia entre 6 e 8 m/h.

Estes filtros podem ser classificados em filtros rápidos a taxa constante (Figura 3.3) ou filtros rápidos a taxa declinante de acordo com o seu regime de operação. Nos primeiros, o caudal é distribuído de forma equitativa através de uma caleira, garantindo que a entrada de água é efetuada a uma cota superior à do nível máximo dos filtros. Assim, o nível de água é diferente em cada um dos filtros, sendo superior nos mais colmatados e consequentemente com maior perda de carga. Quando a água atinge um determinado nível, o filtro é colocado fora de serviço e dá-se início à sua lavagem.

Caso a altura de água seja superior à cota de entrada no filtro considera-se que a sua taxa passa a ser declinante (Tobiason, L., Logsdon e O'Melia, 2010, cap. 10; Logsdon, 2008).

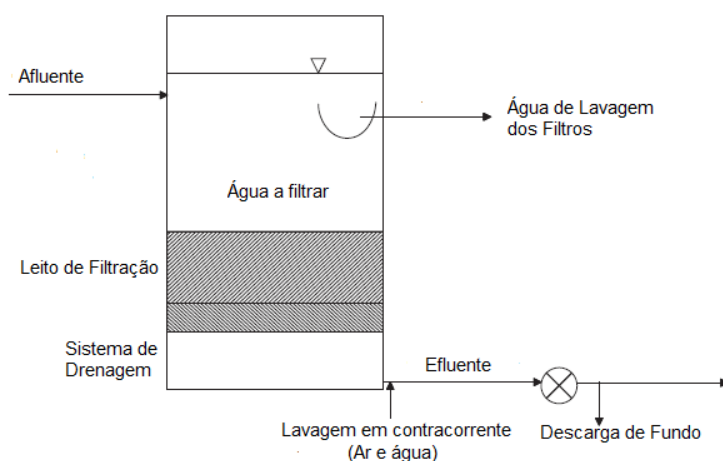


Figura 3.3 - Filtros rápidos de taxa constante e nível variável (adaptado de Binnie e Kimber, 2013)

A turvação à entrada deste tipo de filtros deverá ser inferior a 5 NTU, apesar destes suportarem uma turvação de até 20 NTU. Contudo, elevados valores de turvação dão origem a ciclos de filtração mais curtos e de pior qualidade. Bem dimensionados e operados os filtros têm capacidade para produzir água com valores de turvação entre 0,5 e 1,0 NTU, valores que vão aumentando gradualmente ao longo do ciclo de filtração sendo assim necessário proceder-se à lavagem do leito filtrante.

De acordo com Cleasby e Logsdon (1999, cap. 8) os ciclos de filtração variam entre as 12 e as 96 horas, este limite máximo é importante para evitar o crescimento e proliferação de bactérias bem como a compactação dos sólidos dificultando o processo de lavagem.

Os valores de perda de carga de um filtro limpo são de cerca de 0,3 m em condições teóricas, no entanto ao longo do ciclo este valor pode atingir os 2,0 m (Binnie e Kimber, 2013).

3.5.3. Lavagem dos filtros

Ao longo de um ciclo de filtração o leito filtrante vai ficando colmatado e conseqüentemente a perda de carga vai aumentando, sendo assim necessário proceder à sua lavagem. A operação de lavagem dos filtros poderá ser acionada automaticamente, ajustando intervalos de tempo regulares, valores de perda de carga ou de turvação da água filtrada. Todavia, caso haja deterioração da qualidade da água o operador poderá dar início a esta operação quando achar pertinente (Binnie e Kimber, 2013).

A forma mais eficaz de proceder à lavagem dos filtros rápidos consiste em inverter o fluxo de escoamento da água tratada, permitindo que esta volte a passar pelo meio filtrante (lavagem em contracorrente). É ainda frequente a utilização de ar comprimido por forma a tornar esta operação mais eficiente, reduzindo para cerca de metade a água utilizada (Satterfield, 2005; Logsdon, 2008).

Existem várias técnicas de lavagem de filtros com recurso a ar e água, quer seja em simultâneo ou separadamente. De acordo com Logsdon (2008), a abordagem original envolvia apenas água, recorrendo-se ainda a raspadeiras mecânicas destinadas a agitar o meio filtrante de modo a facilitar a sua lavagem. Outra variante de operação de lavagem em contra corrente consiste em injetar ar, sem fluxo de água, durante 2 minutos, seguindo-se a fase de enxaguamento até que todo o ar seja expelido dos filtros.

No entanto, de acordo com Logsdon (2008) mas também com Binnie e Kimber (2013) a sequência mais eficaz reside em injetar ar durante 2 a 3 minutos no leito filtrante de forma a quebrar a camada superficial que geralmente se encontra colmatada. Em seguida a água é bombada a uma velocidade baixa para proporcionar uma expansão do leito na ordem dos 5% fazendo sair as impurezas pelas caleiras de escoamento, processo que decorre durante cerca de 5 minutos. Por fim o fluxo de ar é interrompido, aumentando a velocidade ascensional da água por forma a lavar completamente o filtro. Contudo, a seleção da técnica de lavagem mais eficaz bem como a duração de cada uma das etapas depende das características do meio filtrante e das particularidades da água a tratar.

É também recomendado, de acordo com Kawamura (2000), que os filtros devem ser lavados até que a turvação da água de lavagem atinja valores entre 10 e 15 NTU.

Aquando do início da injeção de ar ou água no meio filtrante, as partículas ficam suspensas, ocorrendo a sua fluidização. Esta fluidização origina a expansão do leito em 15 a 20% podendo chegar aos 30% e separa as impurezas do meio filtrante, facilitando a lavagem do filtro

A velocidade do ar e água de lavagem necessária para que ocorra fluidização do material filtrante depende de fatores como o diâmetro efetivo do meio, bem como da viscosidade e densidade da água. Dado que a viscosidade e densidade da água variam com a temperatura este parâmetro não será constante ao longo do tempo. Tipicamente o fluxo de ar necessário varia entre os 50 e 80 m³/(m².h) e as velocidades de lavagem entre os 10 e 30 m³/(m².h). Contudo, é possível fazer

a determinação da velocidade de fluidização experimentalmente, com recurso a um filtro piloto que simule as condições exatas dos filtros em estudo (Stevenson, 1995; Cleasby e Logsdon, 1999; Adelman, *et al.*, 2012).

O intervalo de valores associados às velocidades de lavagem com ar e água geralmente utilizados são apresentados na tabela seguinte:

Tabela 3.5 - Valores típicos das velocidades de lavagem com ar e água em função do meio filtrante (adaptado de Cleasby e Logsdon, 1999)

Meio Filtrante	Sequência de Lavagem	Fluxo de Ar $\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{h})$.	Fluxo de água $\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{h})$.
Areia fina (0,5 mm D_e)	1º - Ar	37 - 55	37
	2º - Água		
Areia Grossa (1,0 mm D_e)	1º - Ar e Água	55 - 73	15 - 17
	2º - Água		
Areia Grossa (2,0 mm D_e)	1º - Ar e Água	110 - 146	24 - 29
	2º - Água		

O volume de água necessário para a lavagem do filtro depende da sua profundidade e das características do meio filtrante. Genericamente o volume de água necessário situa-se entre os 4 e 8 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{lavagem}$, sendo geralmente cerca de 2% da água filtrada (Cleasby e Logsdon, 1999).

Durante a fase de lavagem dos filtros que envolvem a fluidização total do leito é fundamental que o nível da água não ultrapasse as caleiras de escoamento da água de lavagem, por forma a evitar o arrastamento do meio filtrante (Binnie e Kimber, 2013; Tobiasson, L. *et al.*, 2010, cap. 10).

A lavagem dos filtros é, de acordo com Logsdon (2008), a fase mais complexa na operação de um sistema de filtração já que exige a manipulação de válvulas e a monitorização e controlo do fluxo de ar e água. Toda a operação deve ser realizada de forma cuidada para não causar danos no meio filtrante bem como no sistema de drenagem.

3.5.4. Análise do desempenho dos filtros

A filtração é uma operação dinâmica uma vez que a qualidade da água afluyente bem como o estado do próprio filtro são diferentes ao longo do tempo. É por isto necessário monitorizar em contínuo parâmetros como a perda de carga, a taxa de filtração e a turvação da água filtrada por forma a avaliar o estado de cada filtro (Logsdon, 2008).

Ao longo do próprio ciclo de filtração, a qualidade da água filtrada vai variando como é possível verificar de forma genérica e qualitativa na Figura 3.4.

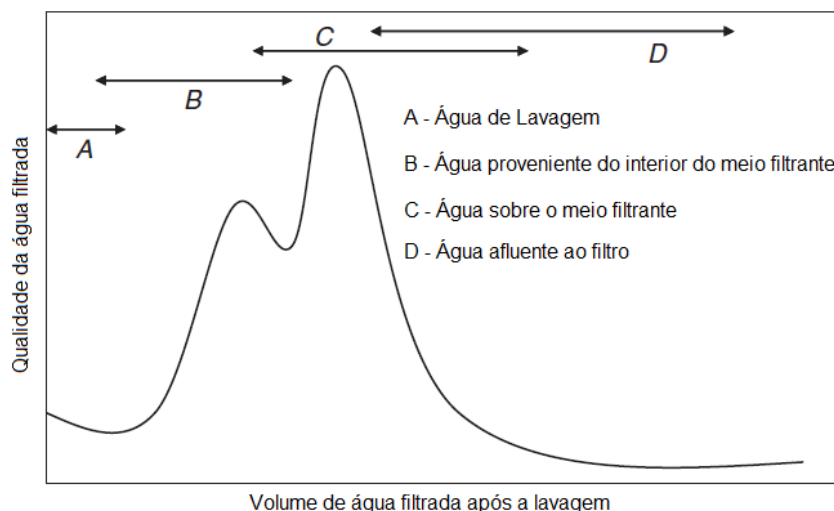


Figura 3.4 - Qualidade da água filtrada após a operação de lavagem (Adaptado de Tobiason, L. et al., 2010, cap. 10)

Geralmente, na fase inicial do ciclo de filtração, imediatamente após a operação de lavagem, a turvação da água filtrada é mais elevada acabando por ir diminuindo até estabilizar. Na fase final do ciclo de filtração os valores de turvação voltam a aumentar rapidamente e consequentemente a qualidade volta a diminuir (Tobiason, L. et al., 2010, cap. 10; Slavik, Jehmliche e Uhl, 2013).

Após a operação de lavagem, quando o filtro volta a entrar em funcionamento pode existir um pico de turvação da água filtrada, que chega a atingir valores superiores a 1,5 NTU o que pode deteriorar a qualidade da água, sendo por isso aconselhável tentar minimizar este problema. A forma mais comum, consiste em desviar da linha de tratamento a água com maior turvação por períodos entre 5 a 30 minutos, sendo também de considerar a adição de coagulante na água de lavagem (Castro, Gary e Martin, 2008, cap. 8; Satterfield, 2005).

De todos os indicadores usados na análise da qualidade da água filtrada, a turvação da própria água filtrada é o mais comum. Contudo, mesmo os turbidímetros mais modernos têm limitações, uma vez que não detetam partículas com um índice de refração semelhante ao da água bem como partículas de CAP, por terem um índice de refração baixo, já que se trata de um material de cor preta (Logsdon, 2008; Colton, Hillis e Caroline, 1996).

Há a considerar um conjunto de problemas relacionados com a operação de filtração que são bastante comuns, e que se repercutem na qualidade do efluente filtrado e na necessidade de lavar os filtros mais regularmente.

Um problema comum está relacionado com a elevada concentração de gases dissolvidos na água a filtrar, que sob determinadas condições atingem o ponto de saturação. A libertação das bolhas de ar impede uma filtração eficaz aumentando as perdas de carga.

A falta de pré-tratamento adequado também é um dos problemas mais recorrentes, uma vez que água afluyente aos filtros não deve ter uma turvação superior a 4 NTU, sendo desejável que os

valores rondem os 2 NTU. Apesar disto os valores de turvação inferiores a 1 NTU também não são aconselháveis pois tornam o sistema menos eficiente.

Outro dos problemas que pode surgir está associado à formação de pressões negativas no interior do filtro (Figura 3.5). No início da operação de lavagem, as partículas são intercetadas pelo leito granular que se encontra na parte superior do filtro, contudo ao longo do tempo o leito fica colmatado e permite a passagem das partículas até maior profundidade aumentando a perda de carga. Caso a perda de carga da areia se torne superior à perda de carga estática da água, dá-se o fenómeno de perda de carga negativa. Este tipo de problemas geralmente acontece quando os filtros já excederam os valores de perda de carga recomendados e uma das consequências deste fenómeno é a libertação de bolhas de ar, que tal como o problema associado ao excesso de gases dissolvidos, impedem uma filtração eficaz (Binnie e Kimber, 2013; Hemming e Fitzpatrick, 1997).

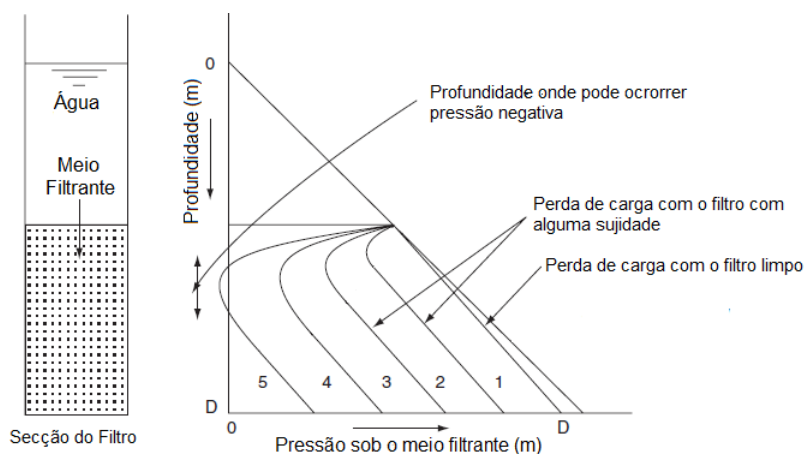


Figura 3.5 - Formação de pressão negativa no interior do filtro (adaptado de Binnie e Kimber, 2013)

A lavagem dos filtros de forma inadequada também pode resultar numa água filtrada de fraca qualidade. Quando os sólidos permanecem nos filtros ao longo dos ciclos vão colmatando e formando rachas ou “bolas de lama”, que alteram as taxas de filtração e consequentemente a qualidade da água. A lavagem precoce de um filtro também pode ter consequências uma vez que causa curto-circuitos hidráulicos alterando a forma como a camada de suporte está organizada. Outra consequência da lavagem dos filtros de forma inadequada é o arrastamento do meio filtrante (Castro, *et al.*, 2008, cap. 8).

Kawamura (1999), refere que o estado dos filtros deve ser avaliado de forma meticolosa anualmente, avaliando as condições de operação de cada filtro.

3.6. Consumo energético em ETA

A operação e manutenção de uma estação de tratamento de água acarreta custos de ordem fixa e variável. Os custos fixos estão relacionados maioritariamente com a remuneração dos colaboradores. Os custos variáveis estão associados à aquisição dos reagentes necessários, reparação e substituição de equipamentos e ao consumo energético da instalação (McGivney e Kawamura, 2008).

De acordo com Plappally e Lienhard (2011) cerca de 7% da energia elétrica produzida mundialmente é gasta no tratamento e distribuição de água para consumo humano bem como no tratamento de águas residuais.

O consumo energético da instalação varia com o seu tamanho e com as exigências de tratamento, sendo estas variações impulsionadas em grande parte pelas economias de escala (EPRI, 2002).

Na tabela seguinte apresenta-se, de acordo com EPRI (2002), a relação entre os consumos energéticos e o volume de água captada, estando esta relação ilustrada na Figura 3.6.

Tabela 3.6 - Relação entre consumos energéticos e volume de água captada (adaptado de EPRI, 2002)

Volume de água captada (m ³ /dia)	Consumo energético (kWh/m ³)
3,785	0,392
18,925	0,375
37,850	0,371
75,700	0,372
189,250	0,372

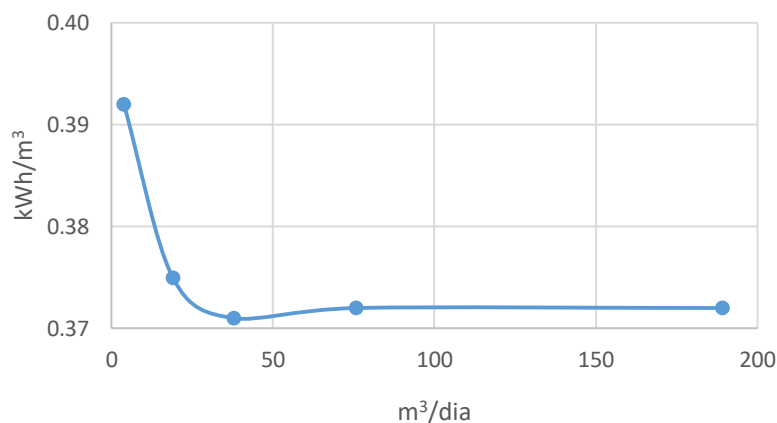


Figura 3.6 - Relação entre consumos energéticos e volume de água captada

Da energia consumida no processo de abastecimento de água, a bombagem é o fator mais relevante seguindo-se as etapas de tratamento da fase líquida e fase sólida. Das etapas de tratamento da fase líquida os maiores consumidores são a mistura rápida e a filtração. Estes autores estimam que a energia consumida na operação de filtração está na ordem dos 0,005 e 0,014 kWh/m³.

4. Metodologia

4.1. Descrição sumária

Com o presente trabalho pretende-se contribuir para a otimização da operação de lavagem dos filtros da ETA de Monte Novo por forma a reduzir o consumo energético da instalação bem como a água gasta durante esta operação. Esta instalação é atualmente explorada pela Águas de Lisboa e Vale do Tejo, S.A., empresa do Grupo AdP – Águas de Portugal.

4.2. Águas de Lisboa e Vale do Tejo, S.A.:

A Águas de Lisboa e Vale do Tejo, S.A., é uma empresa multimunicipal de abastecimento de água para consumo humano e de saneamento de águas residuais, pertencente ao Grupo AdP.

A AdP foi constituída com o principal objetivo de desenvolver sistemas multimunicipais de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais. No ano de 2000, o Estado português passou a integrar o grupo através de participações da Empresa Geral do Fomento (EGF), dando assim a possibilidade ao grupo de entrar no ramo de tratamento e valorização de resíduos sólidos urbanos. Recentemente, o modelo institucional inicial foi reformulado, dando origem ao modelo atual, assentando essencialmente em contratos de parceria entre o Estado e as autarquias locais.

A AdP é um dos grandes grupos do setor do ambiente em Portugal e tem um papel importantíssimo no domínio do abastecimento público de água e do saneamento de águas residuais, ao servir grande parte da população residente em território nacional através de várias empresas (Figura 4.1). No presente, o Grupo AdP agrega mais de quarenta empresas, não só nas áreas de ação já referidas, mas também na área das energias renováveis, serviços partilhados e em mercados internacionais (AdP, 2016).

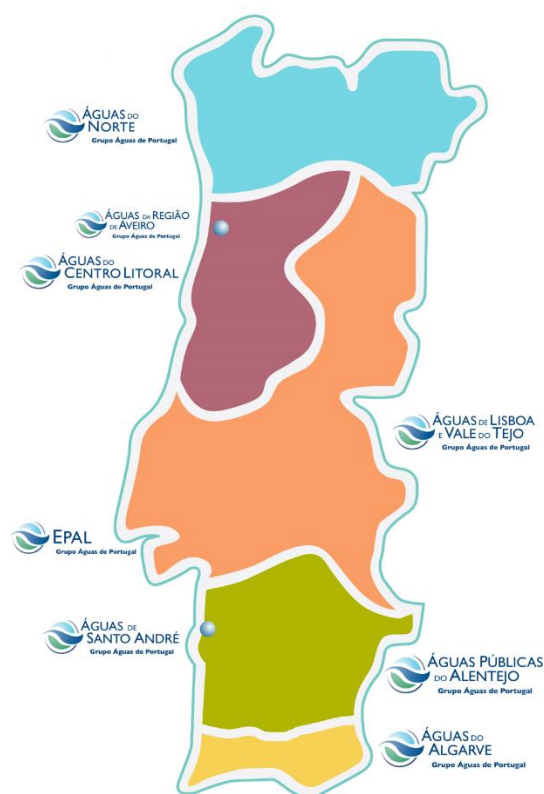


Figura 4.1 - Empresas do Grupo AdP que integram o setor do abastecimento de água e do saneamento de águas residuais (adaptado de AdP, 2016)

Do processo de reorganização do setor do abastecimento de água e saneamento de águas residuais surge a AdLVT, uma sociedade anónima de capitais públicos que resulta da agregação de oito sistemas multimunicipais sendo estes a SANEST, SIMTEJO, SIMARSUL, Águas do Centro, Águas do Zêzere e Côa, Águas do Centro Alentejo, Águas do Norte Alentejano e Águas do Oeste, correspondendo a um total de 86 Municípios abrangidos.

Estima-se que a população residente abrangida pela agregação dos referidos sistemas seja atualmente de 1,1 milhões de habitantes no que se refere a abastecimento de água e de cerca de 3,7 milhões de habitantes relativamente a saneamento de águas residuais estando a gestão da operação deste sistema delegada à EPAL, S.A. (AdLVT, 2016).

Os números relativos às infraestruturas que integram o sistema podem ser observados na tabela seguinte:

Tabela 4.1- Principais características da AdLVT relativas ao ano de 2011 (adaptado de AdLVT, 2016)

Parâmetro	Unidade	Valor
Barragens		4
Captações		322
ETA		49
Conduitas	km	3677
Estações Elevatórias		165
Reservatórios		660

4.3. Caso de Estudo – ETA de Monte Novo

4.3.1. Enquadramento

A estação de tratamento de água de Monte Novo é parte integrante do Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água do Centro Alentejo (Figura 4.2). Este sistema foi dimensionado para garantir o fornecimento de água, em quantidade e em qualidade, a 95% da população total residente dos municípios de Alandroal, Borba, Évora, Mourão, Redondo e Reguengos de Monsaraz.

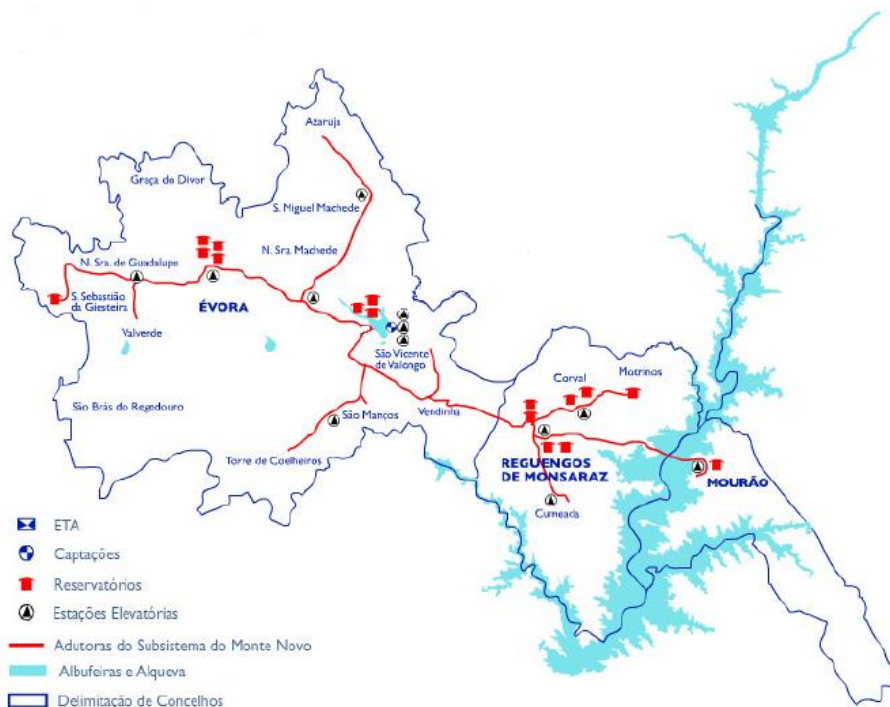


Figura 4.2 - Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água do Centro Alentejo (adaptado de AdLVT, 2016)

O funcionamento deste sistema é assegurado por um conjunto de infraestruturas que se resumem na tabela seguinte:

Tabela 4.2- Dados do Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água do Centro Alentejo (adaptado de AdLVT, 2016)

Parâmetro	Unidade	Valor
Captações		26
ETA		5
Conduatas	km	298
Estações Elevatórias		21
Reservatórios		21

A água tratada pela ETA em estudo é captada na Albufeira de Monte Novo e localiza-se a sudeste da cidade de Évora, na freguesia de S. Manços, que tem como principais afluentes as ribeiras de Bencafete, do Freixo e de Machede (Rodrigues, 2008; SNIRH, 2016).

A Albufeira de Monte Novo está integrada na Região Hidrográfica do Rio Guadiana e constitui uma massa de água da tipologia “Albufeiras do Sul” sendo representada com o código PT07GUA1458. A albufeira em estudo integra uma zona protegida designada para a proteção de espécies piscícolas, ao mesmo tempo que constitui uma zona designada para a proteção de água para consumo humano (PGRH7, 2011. Parte 1). As principais características da albufeira encontram-se resumidas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3- Principais características da Albufeira de Monte Novo

Parâmetro	Unidade	Valor
Capacidade total	dam ³	15277
Capacidade útil	dam ³	14780
Volume morto	dam ³	500
Cota do nível de pleno armazenamento – NPA	m	196
Cota do nível de máxima cheia – NMC	m	196,8
Superfície inundável ao NPA	ha	277,4

4.3.2. Descrição da ETA de Monte Novo

A ETA de Monte Novo dispõe de uma capacidade de tratamento de um caudal máximo de 1 100 m³ de água por hora, o que permite servir uma população estimada em cerca de 70 000 habitantes, garantindo assim o abastecimento de água à cidade de Évora.

Esta estação de tratamento sofreu no ano de 2009 a última intervenção que teve como objetivo a sua ampliação e remodelação, aumentando a capacidade de produção e alterando o processo de tratamento por forma a garantir o cumprimento das novas exigências de qualidade da água para consumo humano.

A linha de tratamento da fase líquida inicia-se na torre de captação, que permite a toma de água da albufeira a três níveis distintos. Segue-se a pré-oxidação, recorrendo ao ozono, materializada numa câmara de ozonização.

A linha de tratamento está ainda equipada com uma câmara de contacto que permite a adição de CO₂ por forma a ajustar o valor de pH, permitindo a otimização do processo de coagulação. A partir desta etapa o tratamento é efetuado em duas linhas em paralelo.

Segue-se a etapa de coagulação que é efetuada numa câmara de mistura rápida mecânica, em que a agitação é garantida através de electroagitadores. O agente coagulante utilizado nesta ETA é o sulfato de alumínio, sendo este adicionado à entrada da câmara de mistura rápida, conjuntamente com leite de cal, para correção do pH da água e ainda carvão ativado em pó para promover a adsorção de toxinas e odores.

À saída deste órgão é adicionado polielectrólito, um agente adjuvante da floculação, posteriormente a água é conduzida para dois decantadores retangulares do tipo manto de lamas ou para dois flotadores (*Ritor*) dependendo do modo de operação pretendido. Ambos os processos têm o objetivo de remover as partículas a suspensão.

A água clarificada é conduzida até uma câmara de contacto onde é adicionado permanganato de potássio, agente que promove a remoção do manganês presente na água. Esta câmara permite também a adição de leite de cal, caso haja necessidade de corrigir o pH.

Segue-se o processo de filtração, composto por duas baterias de filtros, sendo cada uma constituída por quatro filtros rápidos gravíticos de areia de taxa constante e nível variável. Neste tipo de filtros o caudal é igualmente distribuído através de uma caleira comum, iniciando-se a operação de lavagem quando estes atingem o nível máximo de perda carga.

Após a filtração, a água é encaminhada até à cisterna de água filtrada, daqui é retirada a água utilizada na operação da ETA. Finalmente a água passa pela cisterna de contacto de cloro onde é desinfetada, terminando a linha de tratamento com a adição de leite de cal na cisterna de água tratada de modo a afinar o pH.

A linha de tratamento da fase sólida inicia-se num tanque de equalização que recebe a água de lavagem dos filtros bem com as lamas provenientes dos decantadores ou flotadores e ainda as escorrências resultantes do próprio tratamento da fase sólida.

Daqui, as lamas derivam para o espessador gravítico, sendo depois encaminhadas até um tanque de condicionamento onde pode ser adicionado polielectrólito e leite de cal. Por último as lamas são encaminhadas até ao filtro de prensa onde são desidratadas, aguardando a partir daí o encaminhamento até ao destino final.

Na figura seguinte apresenta-se um diagrama de princípio de funcionamento da ETA de Monte Novo:

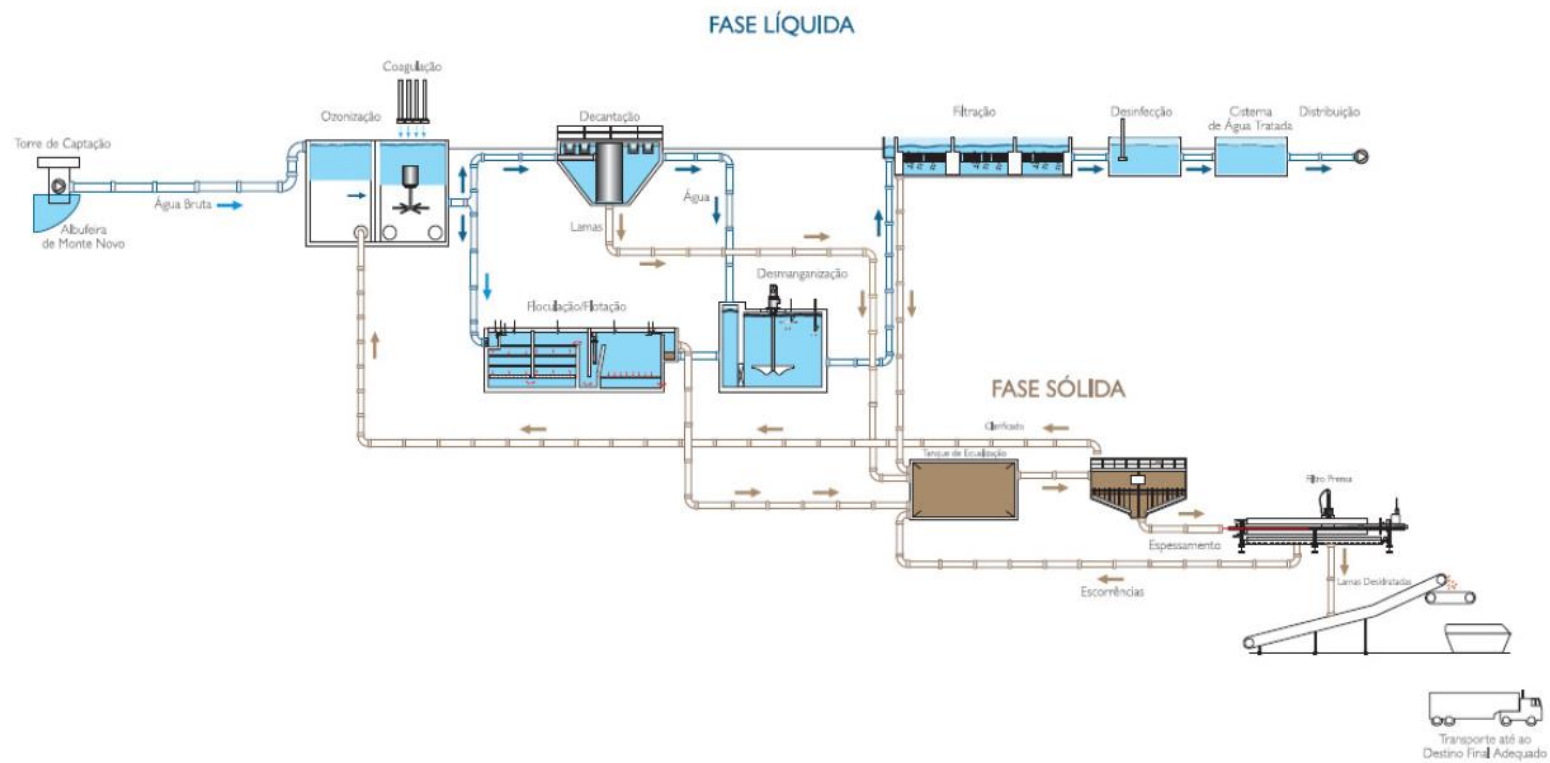


Figura 4.3 - Diagrama linear da instalação

4.3.3. Reagentes utilizados

Relativamente aos reagentes utilizados é de realçar que ozonizador se encontrava fora de serviço aquando do estudo e que a informação disponibilizada acerca da concentração utilizada para cada um dos reagentes carece de confirmação.

Os reagentes que são utilizados na operação da ETA, incluem:

- Ozono, para efeitos de pré-oxidação;
- Dióxido de carbono, para correção da agressividade e pH;
- Leite de cal, para correção da agressividade e pH;
- Carvão ativado em pó, para adsorção de substâncias orgânicas de modo a controlar o gosto e odor;
- Sulfato de Alumínio, como coagulante;
- Permanganato para oxidar o Ferro e o Manganês;
- Polielectrólito como adjuvante da floculação;
- Cloro na desinfeção final.

Os reagentes utilizados, a sua função e respetivos pontos de aplicação, são indicados na tabela seguinte:

Tabela 4.4 - Reagentes utilizados na operação da ETA de Monte Novo

Reagentes	Função	Pontos de aplicação	Concentração média (mg/L)	Consumo diário (kg/dia)
Ozono	Reduzir a matéria orgânica presente na água bruta e melhorar as condições de tratamento das etapas a jusante	Câmara de Ozonização	*	*
CO ₂	Corrigir o pH	Câmara de CO ₂	**	**
Cal hidratada	Corrigir a agressividade, a dureza e o pH	Câmara de Mistura Rápida, Câmara de Desmanganização e Cisterna de Água tratada	25,0	600
CAP	Controlo de compostos absorvíveis, permitindo o controlo do gosto e do odor.	Câmara de Mistura Rápida	6,0	144,0
Sulfato de Alumínio	Coagulante que permite desestabilizar a matéria em suspensão por forma a permitir a sua sedimentação	Câmara de Mistura Rápida	82,0	1968,0
Permanganato	Permite oxidar o ferro e o manganês	Câmara de Desmanganização	1,5	3,5
Polieléctrolito	Floculante que potencia a formação de flocos mais facilmente sedimentáveis.	Tubagem de alimentação ao Decantador e ao Flotador	0,2	4,8
Cloro	Desinfetante	Cisterna de Contacto de Cloro	0,8	19,2

*fora de serviço

**informação não disponibilizada

4.3.4. Filtros instalados

O processo de filtração é efetuado por duas baterias de filtros, sendo cada uma constituída por quatro filtros rápidos gravíticos de areia a operar a taxa constante e nível variável.

Cada filtro tem cerca de 14,58 m², o que perfaz uma área de filtração de 116,64 m². Considerando um caudal afluente de 1000 m³/h a taxa de filtração é de cerca de 8,6 m³/(m².h).

O sistema de filtração está equipado, para o processo de lavagem, com um grupo de duas bombas de 11 kW cada, com um caudal nominal de 480 m³/h e ainda com um grupo de dois supressores de 15 kW.

Nas tabelas seguintes é possível encontrar as principais características técnicas das bombas e dos compressores responsáveis pela lavagem dos filtros.

*Tabela 4.5 - Características técnicas das bombas de lavagem dos filtros
(adaptado de Siemens ICS SA, 2012)*

Motor	Marca	IFIMOTO IBERTICA
	Potência Nominal (kW)	11
	Corrente Nominal (A)	21,5 / 13,6
	Velocidade Nominal (rpm)	1460
Bomba	Marca	Caprari
	Modelo	E18/42/7/30
	Velocidade Nominal (rpm)	1460
Válvula de Seccionamento		Borboleta tipo Wafer
Válvula de Retenção		Válvula de dupla excentricidade com contra peso

*Tabela 4.6 - Características técnicas dos compressores de lavagem dos filtros
(adaptado de Siemens ICS SA, 2012)*

Compressor	Marca	Delta Blower
	Tipo	6M25S
	Quantidade	2
	Ano	2005
	Tipo de compressor	Lobos
	Frequência (Hz)	50
	Pressão Máxima (bar)	1,1
	Potência (kW)	12,3
	Capacidade de produção (m³/min)	18,10
	Velocidade (rpm)	3570
	Tipo de arrefecimento	Ar
	Variador de frequência	Sim

4.3.5. Caracterização energética da ETA

Por forma a caracterizar o consumo energético da instalação, apresenta-se na Figura 4.4 o respetivo consumo médio anual ao longo do período de tempo em estudo.

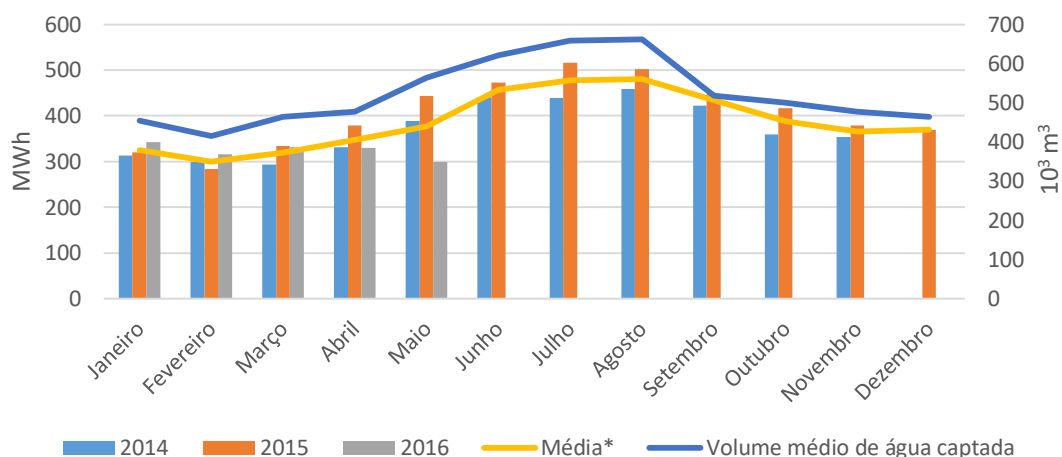


Figura 4.4 – Volume de água captada, consumos energéticos e *respetiva média dos anos em estudo

No período de tempo estudado, o maior consumo foi registado no mês de julho de 2015, tendo representado cerca de 11% do total anual. Ao invés, em março do mesmo ano, foram registados os consumos mais baixos, com valores na ordem dos 300 MWh. Verifica-se assim que o consumo energético está diretamente relacionado com o volume de água captado, tendo por isto uma variação sazonal, sendo claramente superior nos meses de verão.

Da análise do Relatório Preliminar da Auditoria Energética (RPAE) efetuado às instalações da ETA no ano de 2011 (Siemens ICS SA, 2012), verifica-se um padrão do consumo energético pelas diversas secções de produção e serviços auxiliares. Este padrão foi transposto para os consumos energéticos do período de tempo em estudo (Tabela 4.7 e Figura 4.5) por forma a procurar caracterizar energeticamente os diversos setores.

Tabela 4.7 - Distribuição dos consumos de energia elétrica

Setor/equipamento	%	2014 (kWh/dia)	2015 (kWh/dia)	2016 (kWh/dia)	Consumos médios (kWh/dia)
Estação de captação	17,1	2042,4	2222,1	2098,1	2120,8
Tratamento da fase líquida	10,1	1213,4	1320,2	1246,5	1260,0
Tratamento da fase sólida	2,3	276,3	300,6	283,9	286,9
Estações elevatórias	68,8	8265,6	8993,0	8490,9	8583,2
Outros	1,8	216,3	235,3	222,1	174,7
Total	100,0	12014,0	13071,2	12341,5	12475,6

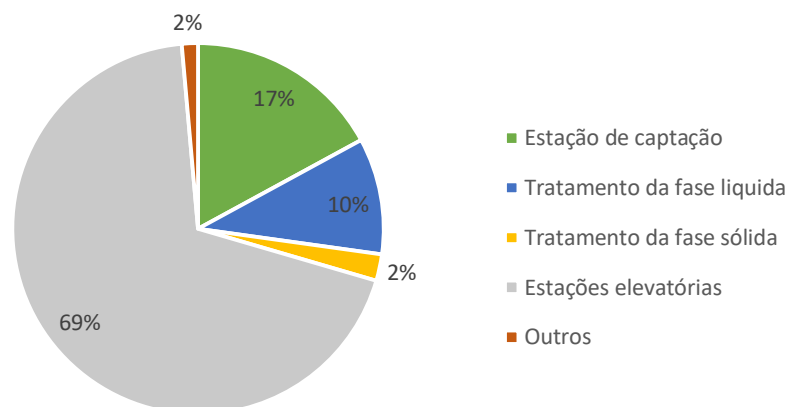


Figura 4.5 - Distribuição dos consumos de energia elétrica

Da análise dos dados apresentados anteriormente, é possível verificar que as estações elevatórias são os maiores consumidores de energia elétrica representando 69% do consumo total da instalação, seguindo-se a secção da captação com 17% do consumo total. O processo responsável pelo tratamento de água, na qual se inclui a operação de filtração, é responsável por cerca de 10% do consumo, já a secção de tratamento de lamas contribui com 2,3% do consumo da instalação. Por último, a secção “outros”, na qual se inclui também a iluminação exterior representa 1,4% do consumo total.

A energia consumida no tratamento da fase líquida é repartida pelos diversos órgãos de tratamento existentes na ETA, sendo a etapa de filtração responsável por 14% deste consumo, tal como ilustrado na figura seguinte.

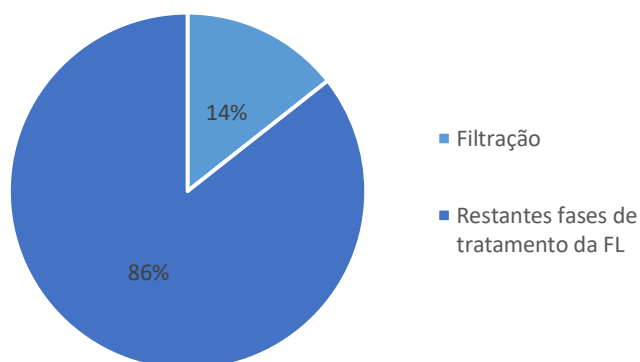


Figura 4.6 - Contributo do consumo energético da etapa filtração no tratamento da fase líquida

Ainda de acordo com o RPAE, o tarifário adotado é o Ciclo Diário (tetra-horário), com potência instalada de 1 890 kVA e potência contratada de 1 063 kW, estimando-se um custo médio de 0,11 € por kWh.

A energia elétrica é fornecida em média tensão sendo depois distribuída para os quadros elétricos de baixa tensão.

4.4. Desenvolvimento do estudo

O plano de trabalho foi elaborado de acordo com a necessidade de avaliar o funcionamento da operação de lavagem dos filtros da ETA em estudo, por forma a atingir os objetivos propostos de otimização do sistema.

Desta maneira, foi necessário avaliar no local as características e particularidades de todo o sistema de tratamento, mais concretamente do sistema de filtração. Este estudo inicial decorreu durante os dias 11 e 16 de Julho de 2016.

Por forma a analisar a eficiência da operação de lavagem dos filtros recorreu-se a um turbidímetro, tendo-se medido a turvação no leito de filtração de cada um dos filtros durante a operação de lavagem e em ambas as etapas de lavagem (etapa de lavagem com ar e etapa de lavagem com água). No fim de cada ciclo de lavagem foi ainda realizado uma análise crítica, de forma qualitativa e empírica, da qualidade do ciclo de lavagem.

Durante o tempo em que não decorria nenhum ciclo de lavagem observou-se toda a linha de tratamento bem com as rotinas de operação efetuadas.

Terminada a recolha dos dados geraram-se gráficos de modo a analisar o funcionamento dos filtros ao longo do seu ciclo de lavagem. Foi igualmente avaliada a qualidade da água com o objetivo de verificar qual a sua repercussão no sistema de filtração.

Verificando-se a necessidade de aprofundar o estudo realizado na primeira visita à ETA, bem como a realização de estudos complementares, voltou-se à instalação nos dias 20 e 21 de dezembro de 2016.

Das várias possibilidades propostas de alteração ao método de lavagem, foram estudadas duas. A primeira, consistiu em aumentar o tempo da fase de lavagem com água em mais 5 minutos, de modo a verificar se a qualidade da água filtrada melhorava e se o ciclo de filtração seria mais longo. A segunda, consistiu na introdução de uma fase lavagem intermédia com ar e água, acabando por terem as três fases (ar, ar e água, água) um período de tempo de 3 minutos, o que permite reduzir o consumo energético da operação bem como o volume de água lavagem necessário. Por forma a ter em conta as consequências destas alterações na qualidade da água, foram realizadas amostras de qualidade durante os ciclos de filtração em estudo. Foi também realizado, em conjunto com o Eng.º José Botelho da AdLVT, a análise dos consumos energéticos desta operação, com recurso a instrumentos dedicados.

Por fim, analisou-se o peso da operação de filtração nos consumos energéticos globais da instalação, bem como o volume de água gasto nesta operação e qual o contributo da otimização desta etapa de tratamento na redução destes consumos.

5. Resultados e Discussão

5.1. Descrição sumária

A primeira componente do trabalho incluiu a análise quantitativa da água a tratar e as características qualitativas da água captada e tratada, bem como as da água afluyente à operação de filtração.

Analizou-se também a operação de lavagem dos filtros (procedimento e tempos de lavagem), o número médio diário de lavagens e caracterizou-se a qualidade da água de lavagem (valores de turvação).

Por último alterou-se a sequência das etapas de lavagem dos filtros, por forma a verificar se estas alterações traziam benefícios a nível de otimização energética, sem que a qualidade da água filtrada fosse comprometida.

5.2. Características quantitativas da água a tratar

A ETA de Monte Novo é responsável pela produção de 95% das necessidades de água dos municípios que abastece, tendo uma capacidade de produção de 1100 m³/h.

O volume de água captada, entre 2014 e 2016 encontra-se representado na Figura 5.1.

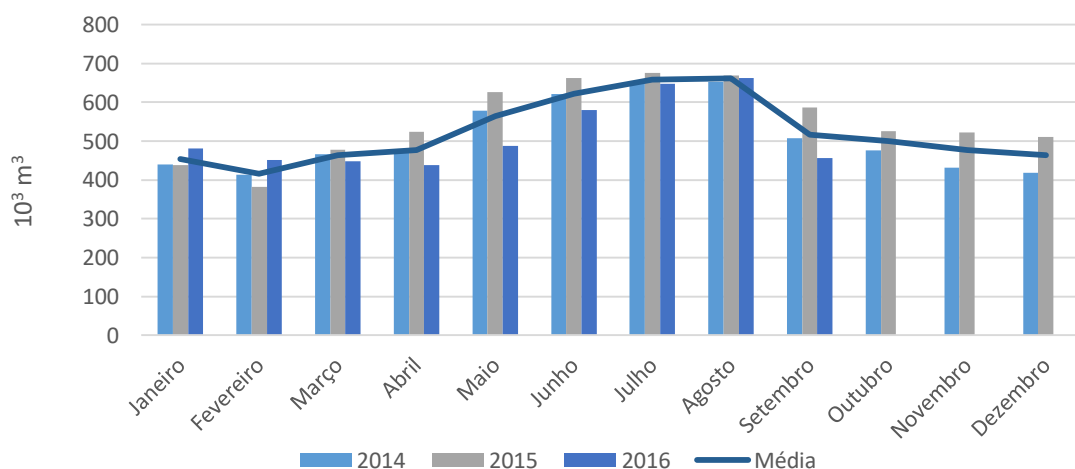


Figura 5.1 - Volume de água captada entre 2014 e 2016

Da análise da Figura 5.1 verificou-se que as necessidades de água têm variações sazonais, sendo superiores nos meses de verão, o que se traduz num volume de água captada maior neste período do ano. A captação de água para tratamento acaba por variar entre os 400 000 m³ e os 700 000 m³ nos meses de menor e maior necessidade, respetivamente.

Da análise dos dados relativo à captação, verifica-se que durante o período de tempo em análise, o maior volume de água captado, num dia, foi de 27 440 m³ em junho de 2015, altura em que instalação atingiu, provavelmente, a sua capacidade máxima de produção.

5.3. Características qualitativas da água captada e tratada

Por forma a qualificar o estado trófico da Albufeira de Monte Novo recorreu-se aos dados analíticos do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH) e ao critério nacional para avaliação do estado trófico em albufeiras e lagos (Silva e Nunes, 2004). Este critério considera três estados tróficos (Oligotrófico, Mesotrófico e Eutrófico) baseados nas concentrações do meio relativamente a três parâmetros analíticos: fósforo total, clorofila-a e oxigénio dissolvido.

O método exige a análise de pelo menos uma amostra por cada estação do ano. Contudo, pelo facto da totalidade dos dados não estar disponível, a análise foi realizada com base nos dados existentes desde 2006.

Os parâmetros de qualidade analisados, de acordo com o método, são representados na tabela seguinte e estão associados ao valor mais desfavorável das amostras.

Tabela 5.1 - Parâmetros de análise do estado trófico da albufeira

Parâmetro	Unidade	Valor*	Eutrófico	Mesotrófico	Oligotrófico
Fósforo total	mg P/m ³	900	>35	10 - 35	<10
Clorofila-a	mg/m ³	58	>10	2,5 - 10	<2,5
Oxigénio dissolvido	% Saturação	1,5	<40	-	-

*Valores mais desfavorável da amostragem existente desde 2006

Apesar da análise não ser efetuada de acordo com o método exigido pelo critério nacional, é possível concluir que albufeira se encontra eutrofizada uma vez que os três parâmetros se encontram no intervalo estipulado para este estado trófico.

Os valores relativos à cota da albufeira entre janeiro de 2014 e dezembro de 2016 estão apresentados na Tabela 5.1.

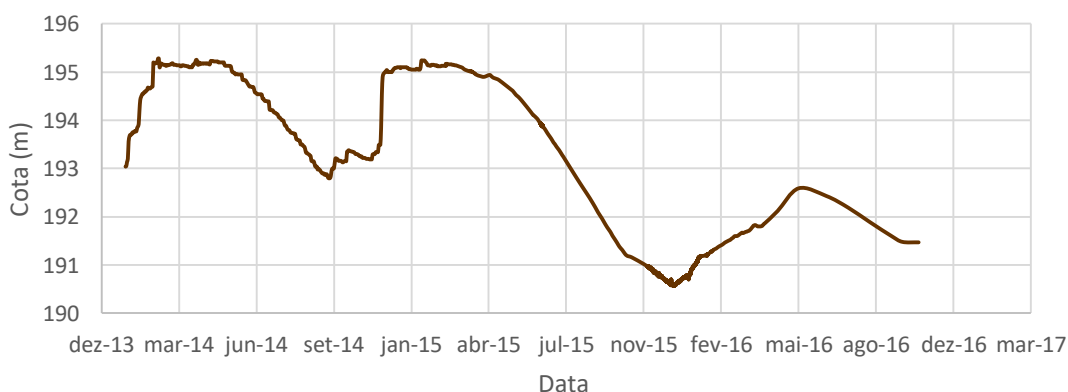


Figura 5.2 – Valores de cota da albufeira de janeiro de 2014 a dezembro de 2016

Verifica-se que durante este período de tempo a variação máxima de cota da albufeira foi de cerca de 4 m, tendo atingindo a cota mais baixa em dezembro de 2015. Entre março e maio de 2014 bem como entre janeiro de 2014 e maio de 2015 a albufeira atingiu as cotas mais elevadas.

De realçar que a cota da albufeira não corresponde necessariamente à cota de captação uma vez que esta é efetuada através de uma torre de captação.

Da análise da qualidade da água captada entre os anos de 2014 e 2016, que se resume na Tabela 5.2, e sem pretender efetuar uma análise exaustiva, verifica-se que a água tem as seguintes características:

- Baixa alcalinidade em determinados períodos (< 100 mg/L CaCO₃);
- Dureza moderada;
- Presença de ferro e manganês;
- Presença de oxidabilidade;
- Elevada amplitude térmica ao longo do ano;
- Variação acentuada de valores de turvação.

Tabela 5.2 - Parâmetros de análise da água bruta

Parâmetro	Unidades	Médio	Máximo	Mínimo	Valor paramétrico legal
Alumínio	µg/L Al	55,3	140,2	23,6	200
Alcalinidade	mg/L CaCO ₃	102,0	137,5	67,5	-
Cloretos	mg/L Cl	36,6	50,7	24,5	250
Condutividade	µS/cm	262,1	451,0	157,8	2500
Dureza total	mg/L CaCO ₃	105,3	170,0	60,0	-
Ferro dissolvido	µg/L Fe	247,3	1037,1	157,8	200*
Manganês Total	µg/L Mn	489,4	1827,8	7,4	50
Nitratos	mg/L NO ₃	1,0	19,3	0,1	50
Oxidabilidade	mg/L O ₂	7,3	8,9	5,0	5
pH	Esc. Sorensen	7,7	8,7	7,1	≥6.5 e ≤9
Temperatura	°C	18,7	29,2	10,1	-
Turvação	NTU	17,3	88,2	3,6	4

* O valor paramétrico vem expresso em ferro total e não em ferro dissolvido

A análise da qualidade da água tratada, para o mesmo período de tempo acima referido, encontra-se resumida Tabela 5.3.

Tabela 5.3- Parâmetros de análise da água tratada

Parâmetro	Unidades	Médio	Máximo	Mínimo	Valor paramétrico legal
Alumínio	µg/L Al	53,8	121,5	23,3	200
Alcalinidade	mg/L CaCO ₃	87,3	132,1	47,5	-
Cloretos	mg/L Cl	38,6	52,0	26,0	250
Cloro Residual Livre	mg/L Cl ₂	0,8	1,3	0,03	0,2 - 0,6**
Condutividade	µS/cm	322,0	499,0	199,9	2500
Dureza total	mg/L CaCO ₃	131,7	240,0	90,0	-
Ferro dissolvido	µg/L Fe	7,0	20,7	0,	200*
Manganês Total	µg/L Mn	16,1	53,0	10,0	50
Nitratos	mg/L NO ₃	16, 8	18,5	13,8	50
Oxidabilidade	mg/L O ₂	2, 8	4,7	1,1	5
pH	Esc. Sorensen	7,4	7,9	6,9	≥6.5 e ≤9
Temperatura	°C	18, 5	27,8	9,9	
Turvação	NTU	0,5	2,2	0,2	4

* O valor paramétrico vem expresso em ferro total e não em ferro dissolvido

** Valor recomendado

Da análise da informação disponível verifica-se, na generalidade, o cumprimento dos valores paramétricos previstos no Anexo I do Decreto-Lei nº 306/2007, de 27 de agosto. Dos parâmetros analisados o manganês é o único que ultrapassou pontualmente o valor estabelecido por lei, tendo esta situação ocorrido apenas duas vezes em todo o período de amostragem e em valores ligeiramente acima do permitido. De realçar também que a concentração de cloro residual livre nem sempre esteve no intervalo de valores recomendados.

Por forma a ter uma perceção mais detalhada da qualidade da água captada e tratada e consequentemente da eficiência da linha de tratamento analisou-se cada um dos parâmetros de qualidade, cruzando em simultâneo as amostras a montante e a jusante da linha de tratamento.

A figura seguinte representa a temperatura da água captada e tratada ao longo do período de amostragem. Idealmente este parâmetro deverá ser o mais constante possível uma vez que alguns processos químicos de tratamento dependem de determinada temperatura ótima. Fatores como a viscosidade ou taxa de crescimento biológico também estão relacionados diretamente com a temperatura da água (Spellman e Drianan, 2012).

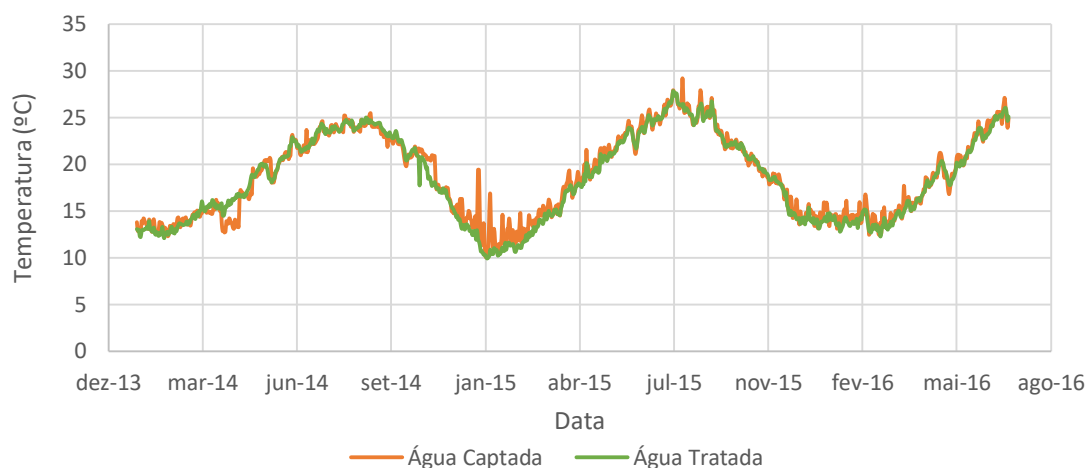


Figura 5.3 - Temperatura da água captada e tratada ao longo do tempo

Da análise da Figura 5.3 verifica-se que a temperatura da água captada e tratada é muito idêntica, como seria expectável, variando entre os 10 e os 29 °C, estando os valores mais elevados associados aos meses de verão e os mais baixos associados aos meses de inverno.

Os valores médios diários de turvação da água captada e tratada, ao longo do tempo, estão representados na Figura 5.4, já na Figura 5.5 são apresentados os valores médios mensais. A turvação da água é causada pela presença de partículas em suspensão e matéria coloidal que impedem a refração da luz na água. Este parâmetro é medido em NTU (unidades nefelométricas de turvação) e compara a refração da luz ao passar pela amostra com um feixe de luz com a mesma intensidade ao passar numa solução padrão (Alves, 2010; WHO, 2011).

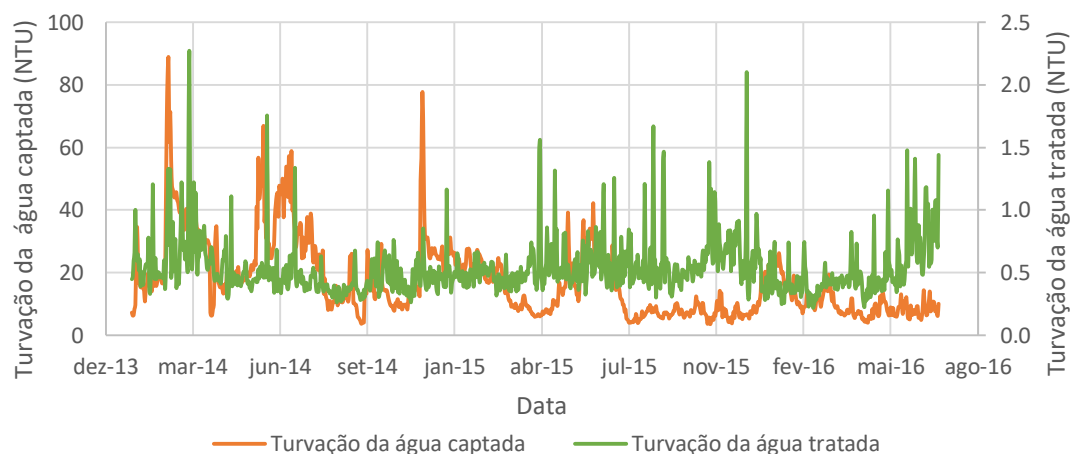


Figura 5.4 - Valores médios diários de turvação da água captada e tratada

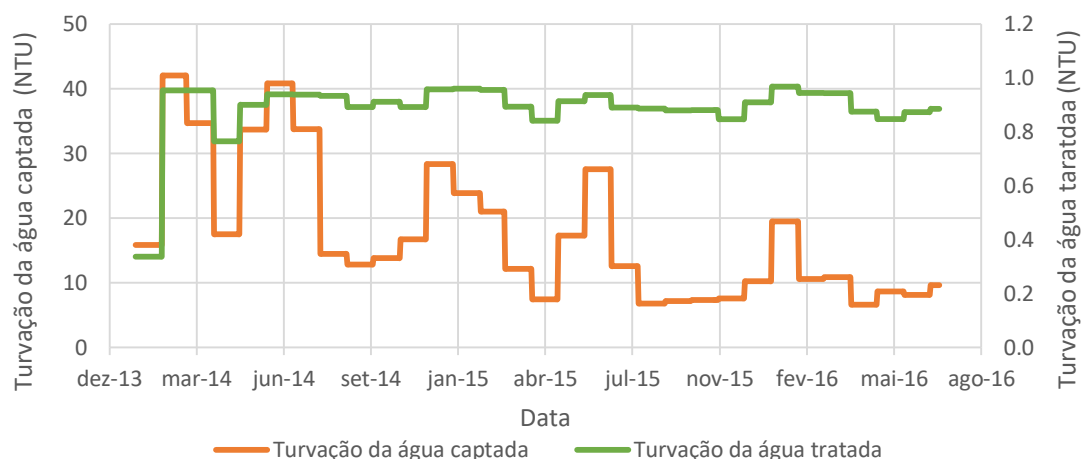


Figura 5.5 - Valores médios mensais de turbidez da água captada e tratada

Através da análise da Figura 5.4 podemos verificar que a turbidez da água captada tem grandes variações ao longo do tempo, atingindo pontualmente valores na ordem dos 80 NTU. Por outro lado, pela análise da Figura 5.5 verifica-se que os valores médios mensais variam entre os 8 NTU e os 40 NTU, em fevereiro de 2014 e abril de 2015, respetivamente. Esta variação de turbidez exige por parte da operação um cuidado acrescido, controlando regularmente a concentração de coagulante a dosear (Logsdon, Hess, Chipps, & Rachwal, 2002).

A turbidez da água tratada apresenta variações entre os 0,1 e 2 NTU, já em termos médios mensais verifica-se que a turbidez varia entre 0,2 e 1,0 NTU, sensivelmente.

Apesar deste parâmetro ser sempre inferior ao valor de referência de 4 NTU, os picos de turbidez podem contribuir para limitar o processo de desinfecção, tornando-o menos eficiente. Outro aspeto associado ao aumento da turbidez prende-se com o impacto visual (negativo) para o consumidor (WHO, 2011). Analisando os valores médios mensais, observa-se que estes são sempre inferiores a 1 NTU, tendo sido registados valores na ordem dos 0,3 NTU em janeiro de 2014.

Por forma a avaliar se os picos de turbidez detetados na Figura 5.4 são consequência da variação do nível da cota da albufeira, cruzou-se a informação relativa a estes dois parâmetros (Figura 5.6).

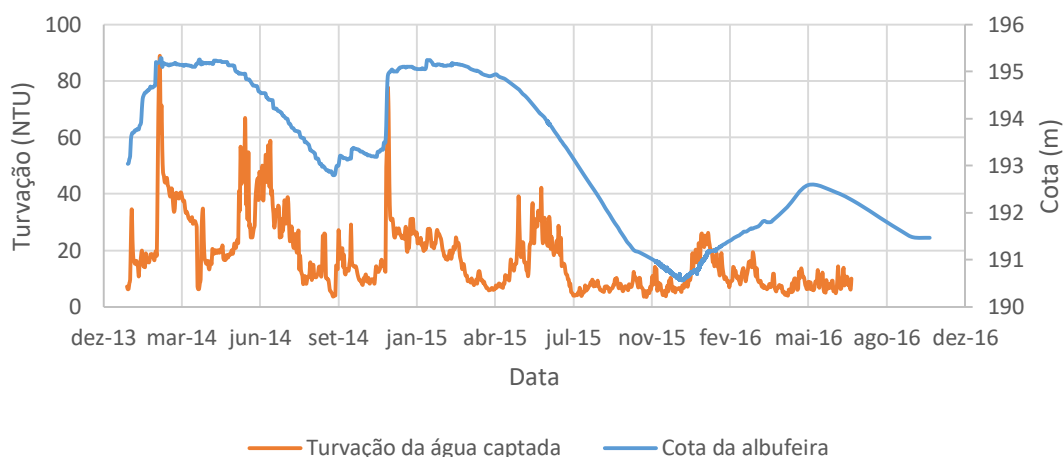


Figura 5.6 - Relação entre os valores de cota da albufeira e os valores de turvação da água captada

Da análise da Figura 5.6, observa-se que imediatamente a seguir à subida do nível da albufeira ocorre um aumento da turvação, provavelmente consequência do arrastamento provocado pela precipitação. Verifica-se igualmente que a turvação volta a subir quando o nível da albufeira começa a descer.

Os valores de pH da água captada e tratada ao longo do tempo estão representados na Figura 5.7.

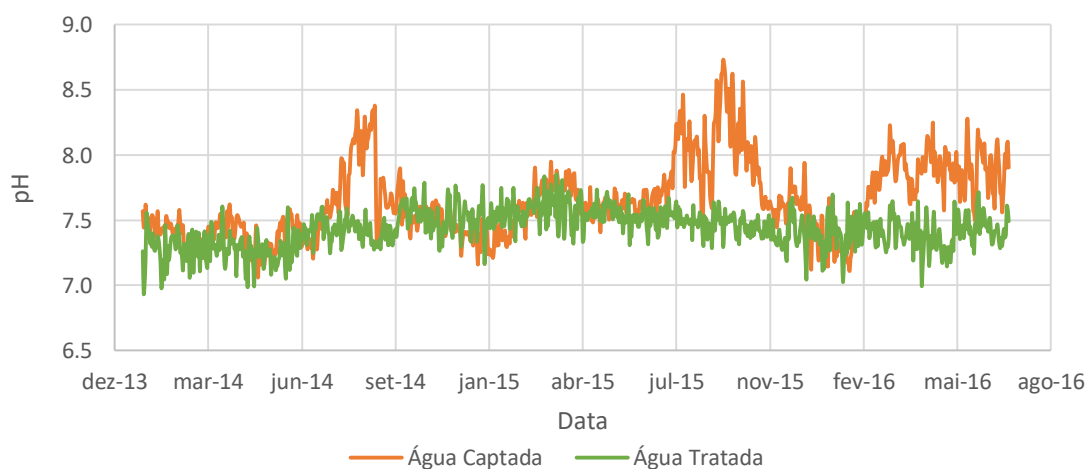


Figura 5.7 - pH da água captada e tratada ao longo do tempo

Da análise da Figura 5.7 é possível comparar os valores de pH da água captada e tratada, constatando-se que o pH da água bruta tem variações ao longo do tempo, tendo ocasionalmente valores perto dos 8,5. Já os valores de pH da água tratada são bastante estáveis variando entre os 7,0 e os 8,0, estando assim no intervalo de referência.

Na Figura 5.8, pode-se observar os valores da dureza da água captada e tratada ao longo do tempo. A variação deste parâmetro é causada pela variedade de iões metálicos polivalentes dissolvidos na água, predominantemente catiões de cálcio e magnésio.

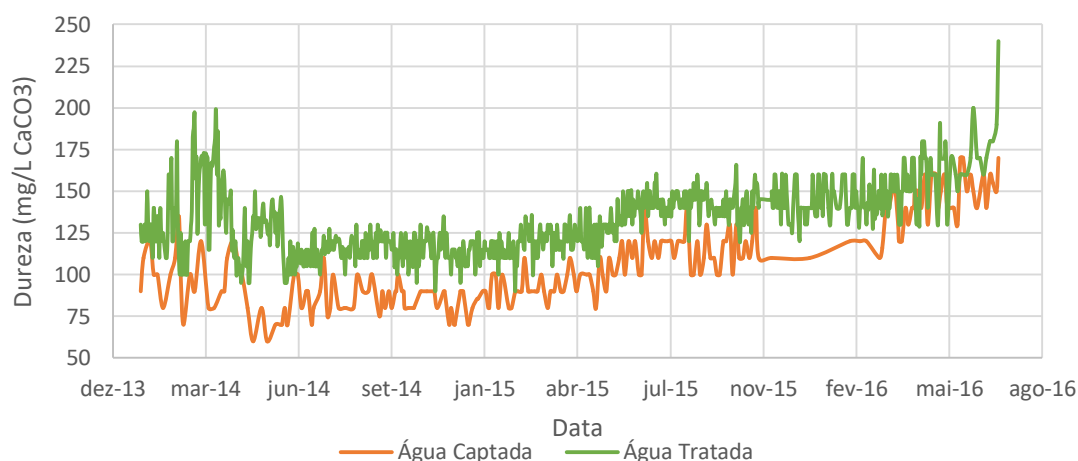


Figura 5.8 - Dureza da água captada e tratada ao longo do tempo

Os valores de dureza da água captada variam entre os 70 mg/L CaCO₃ e os 175 mg/L CaCO₃. Da análise das amostras verifica-se que o valor médio de dureza é de cerca de 105 CaCO₃ e que este parâmetro acaba por ser afinado na linha de tratamento para valores na ordem dos 135 mg/L CaCO₃.

De acordo com a WHO (2011), os consumidores toleram valores de dureza até aos 500 mg/L CaCO₃, apesar do sabor se tornar desagradável. Dependendo da interação com outros fatores como o pH e a alcalinidade a dureza acima dos 500 mg/L CaCO₃ pode causar incrustações nas tubagens e nos sistemas de aquecimento, no entanto as águas mais duras têm efeitos potencialmente protetores contra doenças cardiovasculares. Por outro lado, águas mais macias com valores abaixo dos 100 mg/L CaCO₃ podem ser corrosivas para as tubagens.

Este parâmetro deve ser analisado em conjunto com a alcalinidade (Figura 5.9) uma vez que estes refletem o conteúdo mineral da água e o seu poder tampão. A alcalinidade da água representa a capacidade desta para neutralizar ácidos e deve-se essencialmente à presença de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos.

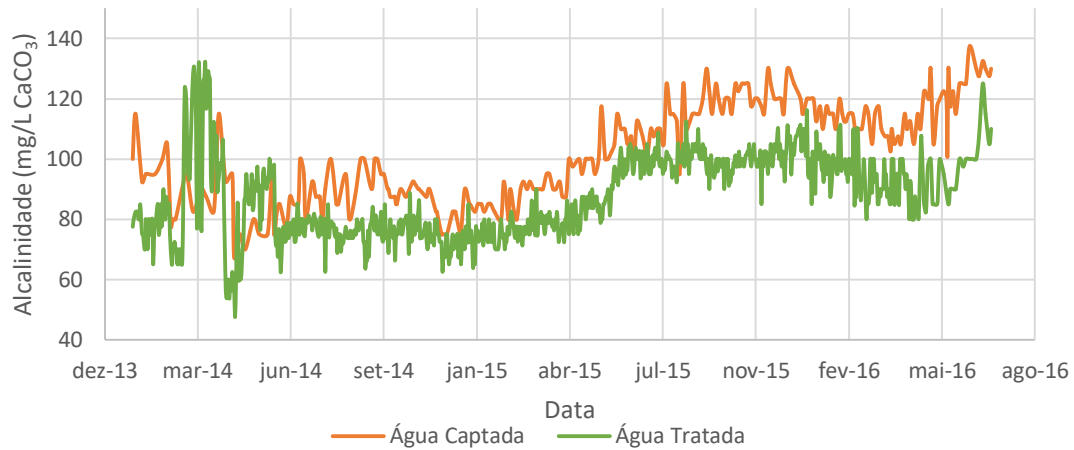


Figura 5.9 - Alcalinidade da água captada e tratada ao longo do tempo

Verifica-se através da Figura 5.9 que a alcalinidade da água captada varia entre os 68 e os 138 mg/L CaCo₃. O valor mínimo é bastante baixo o que poderá por em causa o processo de coagulação, caso não haja a afinação necessária de forma a ajustar o valor de alcalinidade até aos valores ótimos do coagulante utilizado. Já os valores de alcalinidade da água tratada variam entre 47 mg/L CaCo₃ e 132 mg/L CaCo₃, da análise das amostras constata-se que o valor médio é de cerca de 88 mg/L CaCo₃ o que acaba por ser bastante razoável, considerando que uma alcalinidade mais elevada poderia repercutir-se num sabor desagradável da água.

Na Figura 5.10 é possível avaliar a concentração de alumínio na água ao longo do tempo. Este elemento ocorre naturalmente nas águas, surgindo como um sal solúvel, coloide ou composto insolúvel, podendo também ser um produto residual do processo de tratamento, caso a linha utilize sulfato de alumínio como coagulante. A bioacumulação deste elemento pelo Homem tem sido associada à ocorrência de doenças como o Alzheimer o que tem originado uma maior preocupação na redução da concentração deste elemento no tratamento de água (Spellman e Drianan, 2012; WHO, 2011).

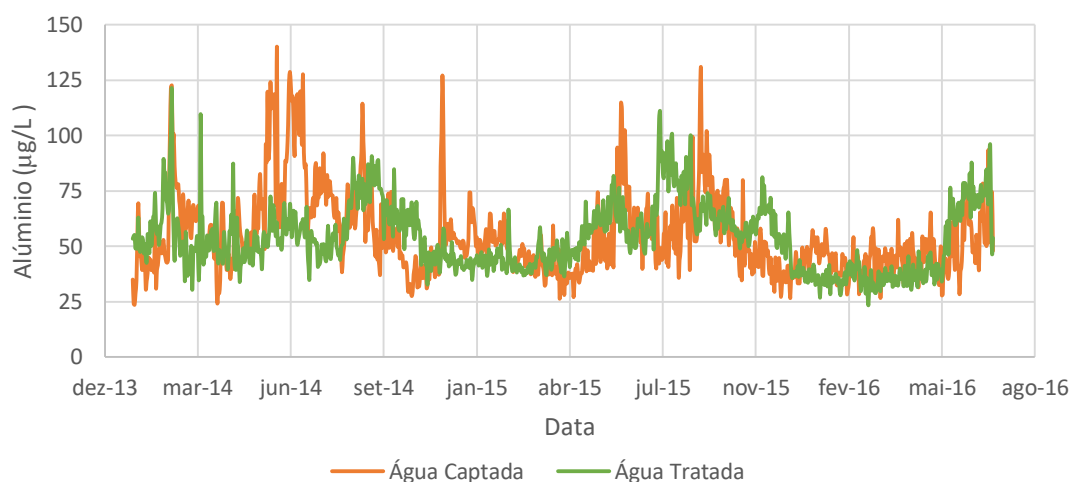


Figura 5.10 - Concentração de alumínio na água captada e tratada ao longo do tempo

A presença de alumínio na água captada tem uma variação eventualmente sazonal atingindo valores na ordem dos 140 $\mu\text{g/L}$ nos períodos de verão, concentrações que ainda assim acabam por ser inferiores ao valor paramétrico de 200 $\mu\text{g/L}$. Em relação à presença deste elemento na água tratada, verifica-se que tem uma variação que se correlaciona com a água captada, ou seja, as concentrações mais elevadas na água captada repercutem-se na água tratada. Pela análise das amostras verifica-se ainda que este parâmetro tem um valor médio de na ordem dos 53 $\mu\text{g/L}$.

A variação da concentração de ferro dissolvido ao longo do período de amostragem está representada na figura seguinte. Este elemento provem essencialmente da lixiviação dos solos pelo que as concentrações são normalmente superiores nas águas de origem subterrânea. A presença deste metal geralmente não dá sabor à água em concentrações inferiores a 300 $\mu\text{g/L}$, contudo, ao oxidar, precipita manchando as loiças sanitárias (WHO, 2011).

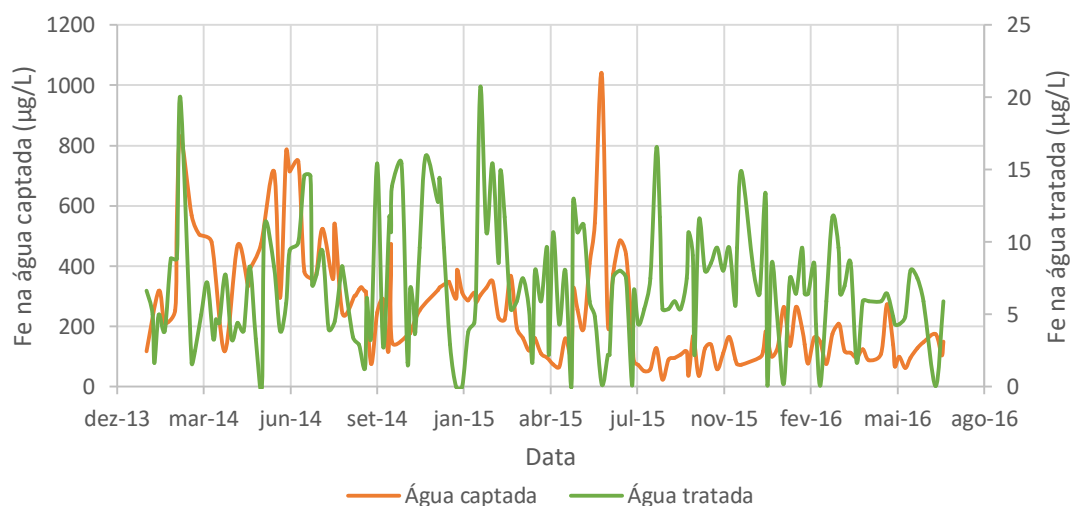


Figura 5.11 - Concentração de ferro dissolvido na água captada e tratada ao longo do tempo

A concentração deste metal na água captada, ao longo do período de amostragem, varia de forma muito significativa, sendo por vezes superior a 1000 $\mu\text{g/L}$. Tal como na água captada, na água tratada a concentração de ferro dissolvido teve grandes variações ao longo do tempo,

sendo, contudo, sempre inferior a 20 µg/L o que denota uma boa eficiência da linha de tratamento. De realçar que este parâmetro diz respeito ao ferro dissolvido, sendo por isso impossível compará-lo com o valor paramétrico legal, que se refere ao ferro total.

O manganês é um elemento que acompanha o ferro em virtude do seu comportamento geoquímico. A presença deste elemento em quantidades elevadas é indesejável devido ao seu efeito no sabor, tingimento das instalações sanitárias e formação de incrustações nos sistemas de distribuição. Pode causar ainda danos do foro neurológico aquando da ingestão de água com elevados níveis de contaminação (Alves, 2010). O valor deste elemento ao longo do tempo está evidenciado na Figura 5.12.

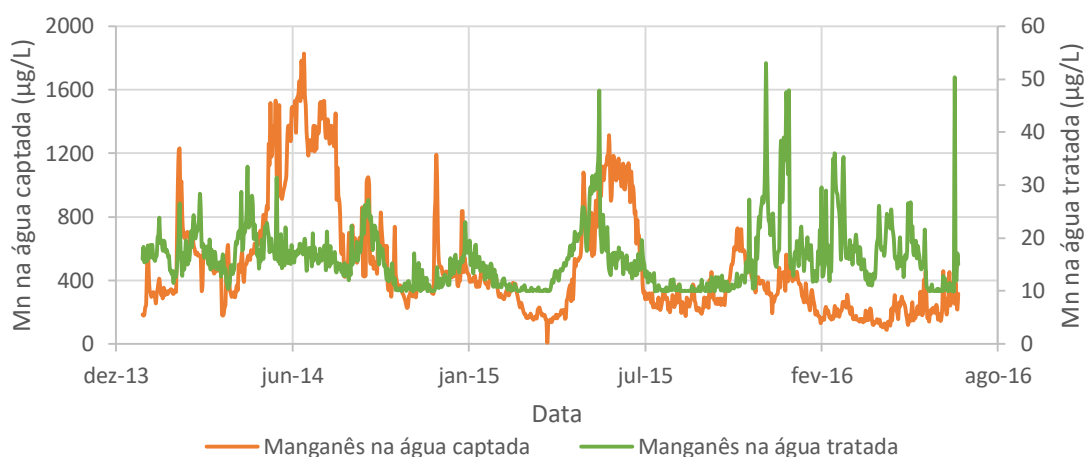


Figura 5.12 - Concentração de manganês na água captada e tratada ao longo do tempo

A presença deste metal na água captada teve ao longo do tempo uma variação expressiva, atingindo o valor máximo de 1775 µg/L no verão de 2014. Este elemento encontra-se muitas vezes nas águas superficiais, principalmente em condições anaeróbias ou de baixa oxidação. Apesar da linha de tratamento estar equipada com uma etapa dedicada à remoção deste elemento (câmara de contato com permanganato de potássio), o manganês foi o parâmetro de qualidade que provocou mais dificuldades à instalação, acabando por atingir durante o ano de 2016 valores acima da conformidade legal (50 µg/L), por duas vezes.

De acordo com Alves (2010), existe um conjunto de parâmetros de qualidade, na qual se incluem os metais atrás analisados (ferro, alumínio e manganês), que têm uma variação em função da profundidade a que a água é captada. Por forma a avaliar a variação sazonal destes parâmetros, cruzou-se a informação relativa à sua concentração na água captada com o valor da cota da albufeira ao longo do tempo (Figura 5.13), uma vez que para valores de cota inferiores existe a necessidade de se captar a água a níveis igualmente inferiores.

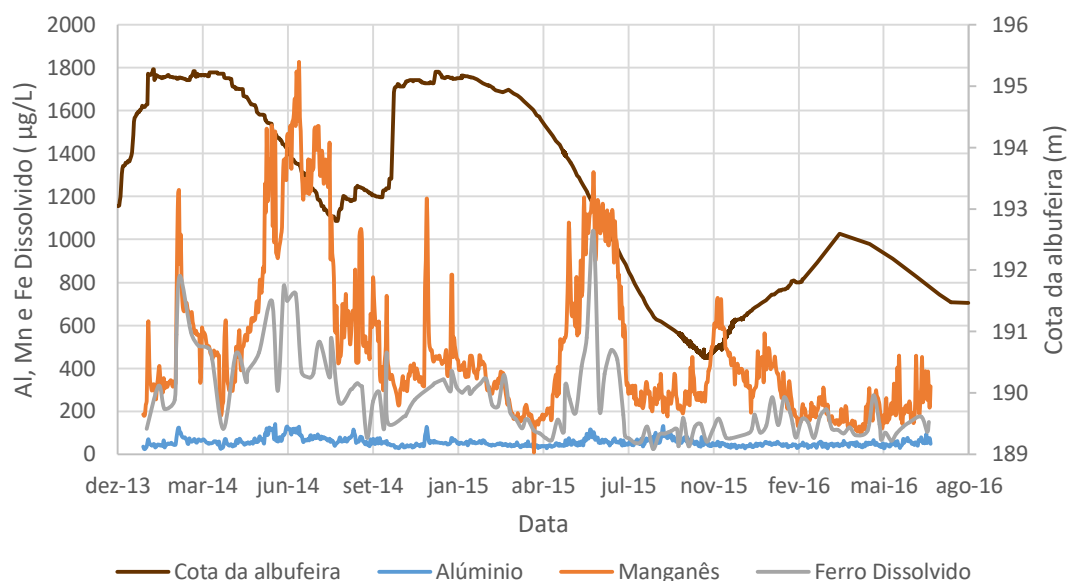


Figura 5.13 - Relação entre a concentração dos parâmetros, ferro, alumínio e manganês, e o valor de cota da albufera

Pela análise da Figura 5.13 verifica-se que a concentração destes três parâmetros parece estar inversamente relacionada com o valor da cota albufera, desta forma, para valores de cota inferiores verifica-se concentrações de metais na água mais elevadas.

A condutividade é a capacidade da água conduzir corrente elétrica, indicando assim a presença de substâncias químicas. Este parâmetro é medido através de um condutímetro, sendo expressa em microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$). O aumento da condutividade está geralmente relacionado com a presença de sólidos inorgânicos dissolvidos e ainda catiões de sódio, magnésio, cálcio, ferro e alumínio (Spellman e Drianan, 2012). A condutividade da água ao longo do tempo está representada na Figura 5.14.

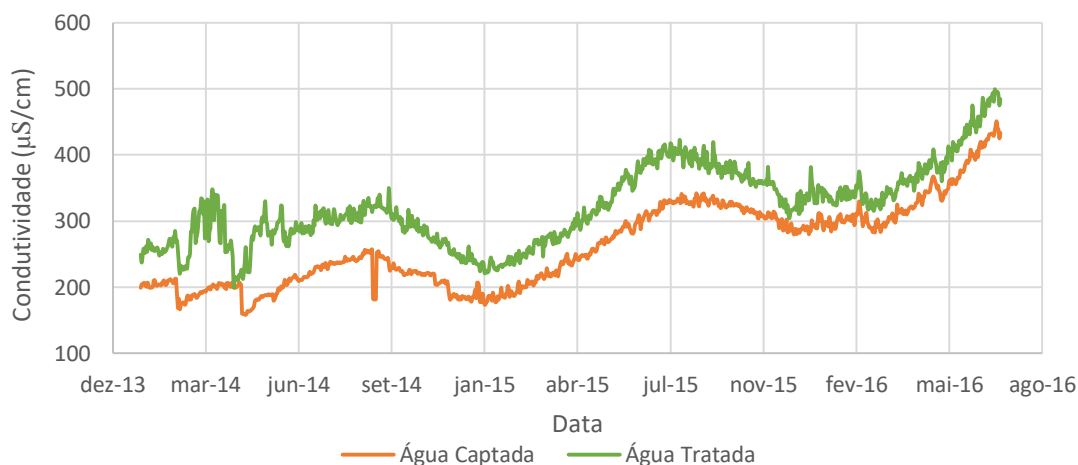


Figura 5.14 - Condutividade da água captada e tratada ao longo do tempo

Este parâmetro tem um aumento médio gradual ao longo do período de amostragem, quer na água captada quer na água tratada o que é indicador do aumento da presença de substâncias químicas, apesar não ser possível definir quais. Verifica-se ainda que ambas as amostras estão

correlacionadas, sendo a condutividade da água tratada superior à da captada, provavelmente pela adição de reagentes ao longo da linha de tratamento.

Os valores máximos deste parâmetro foram atingidos durante o mês de julho de 2016 e rondam os 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A análise do gráfico é indicativa do aumento da concentração de minerais na água ao longo do tempo, apesar de não conseguirmos identificar qual dos componentes é que provocou este aumento. Este acréscimo de oxidabilidade pode ainda ser explicado com a diminuição do valor da cota da albufeira, nos últimos meses de estudo.

A oxidabilidade é o último parâmetro indicador da qualidade da água a ser analisado e está representado na Figura 5.15. Sendo a oxidabilidade um parâmetro indicador de contaminação por matéria orgânica e matéria inorgânica oxidável, é considerado um indicador global de poluição orgânica.

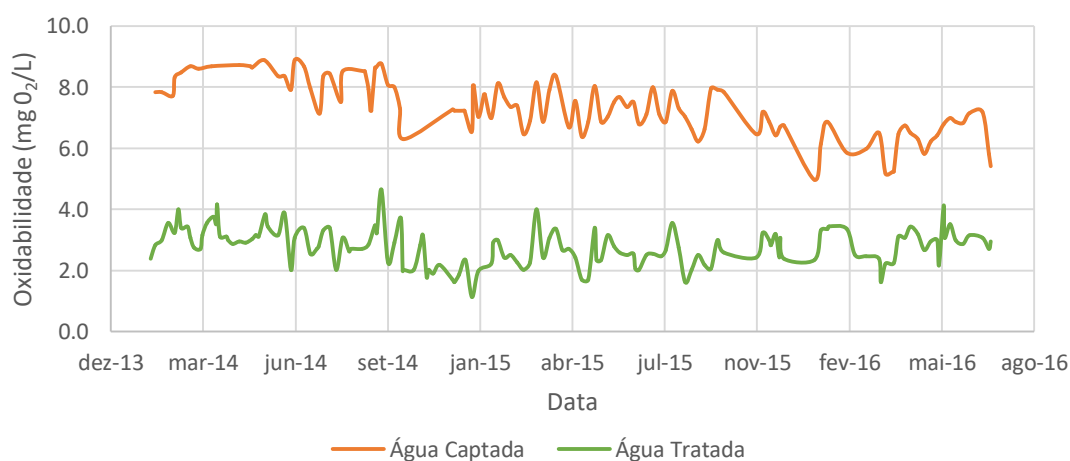


Figura 5.15 - Oxidabilidade da água captada e tratada ao longo do tempo

A oxidabilidade da água captada tem uma variação constante, ao longo do período da amostragem, verificando-se pela análise das amostras de água captada que o seu valor médio é de 7 mg/L O_2 . A oxidabilidade da água tratada varia entre 1,13 e 4,65 mg/L O_2 , valores sempre dentro da conformidade legal que se situa nos 5 mg/L O_2 , contudo, os valores estiverem perto de ultrapassar este limite por várias vezes.

5.4. Eficiência da operação de filtração

A operação de filtração tem como principal objetivo a remoção de turvação da água. Por forma a avaliar a evolução deste parâmetro ao longo do período de amostragem elaboraram-se a Figura 5.16 e Figura 5.17 onde estão representados os valores médios diários e os valores médios mensais de turvação da água captada e da água afluente aos filtros, isto é, após as primeiras etapas de tratamento.

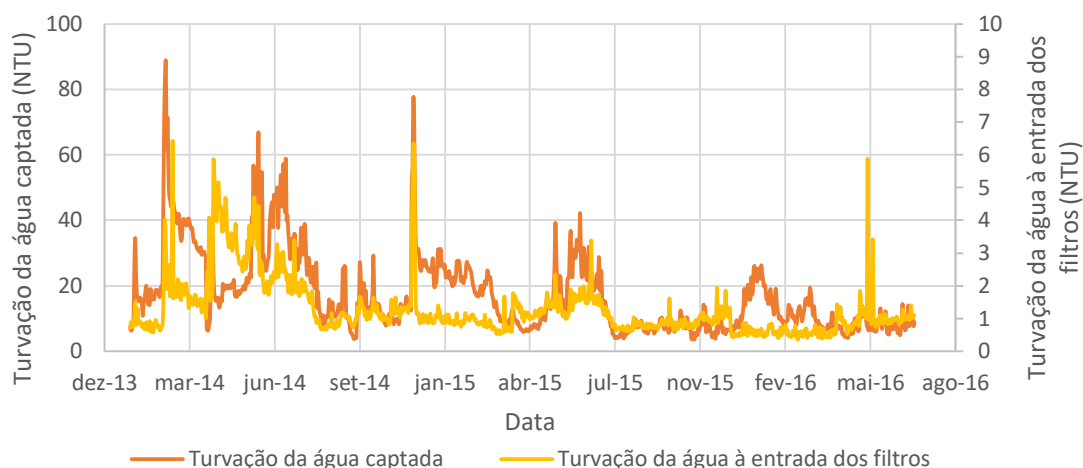


Figura 5.16 – Valores médios diários de turbidez da água captada e a montante do sistema de filtração, ao longo do tempo

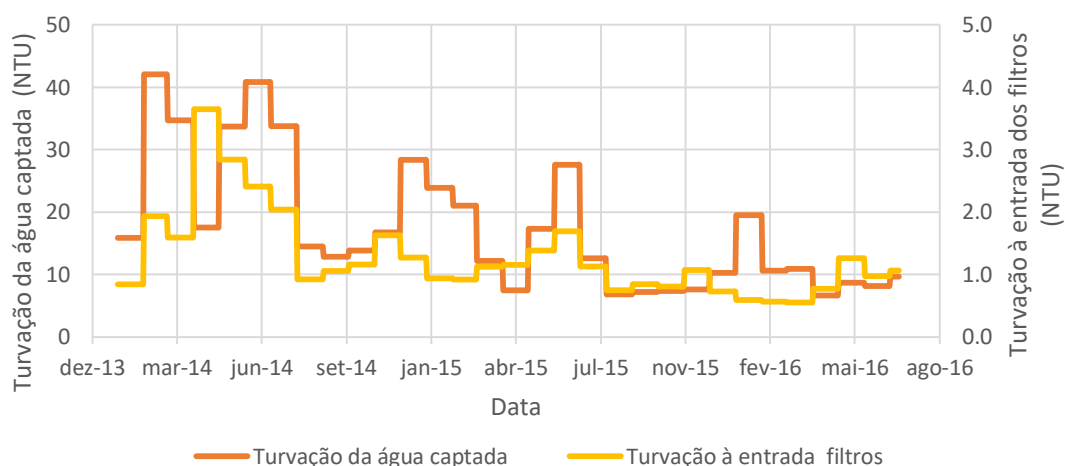


Figura 5.17 - Valores médios mensais de turbidez da água captada e a montante do sistema de filtração, ao longo do tempo

Da análise da Figura 5.16 podemos verificar que a turbidez da água captada apresenta valores que variam ao longo do tempo, atingindo ocasionalmente os 80 NTU. Já pela análise da Figura 5.17 observa-se que os valores médios mensais da água captada variam entre os 8 NTU e os 40 NTU. Através das amostras disponibilizadas verificou-se que os valores médios diários de turbidez à entrada da instalação são de cerca de 17,3 NTU.

Ao longo das etapas de tratamento a turbidez vai sendo removida, chegando à operação de filtração com valores médios diários na ordem dos 1,4 NTU, tendo atingido pontualmente valores na ordem dos 6 NTU.

Apesar dos valores médios de turbidez da água à entrada dos filtros serem inferiores a 4 NTU, valor máximo recomendado pela bibliografia, ocasionalmente estes valores são superiores sobrecarregando os filtros.

Por forma a avaliar a eficiência da operação de filtração, analisou-se as amostras de turvação da água a montante e a jusante deste órgão estando representado na Figura 5.18 os valores médio diários e na Figura 5.19 os valores médios mensais.

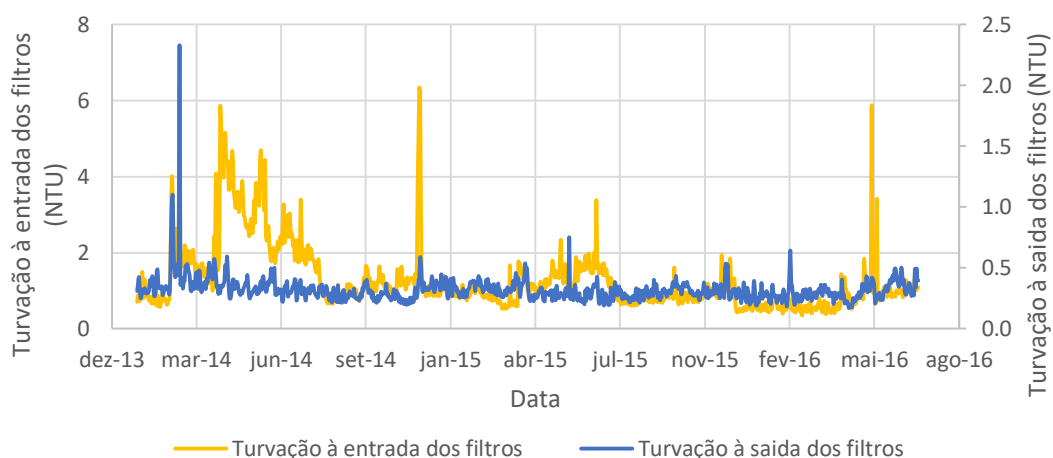


Figura 5.18 - Valores médios diários de turvação da água a montante e jusante do sistema de filtração, ao longo do tempo

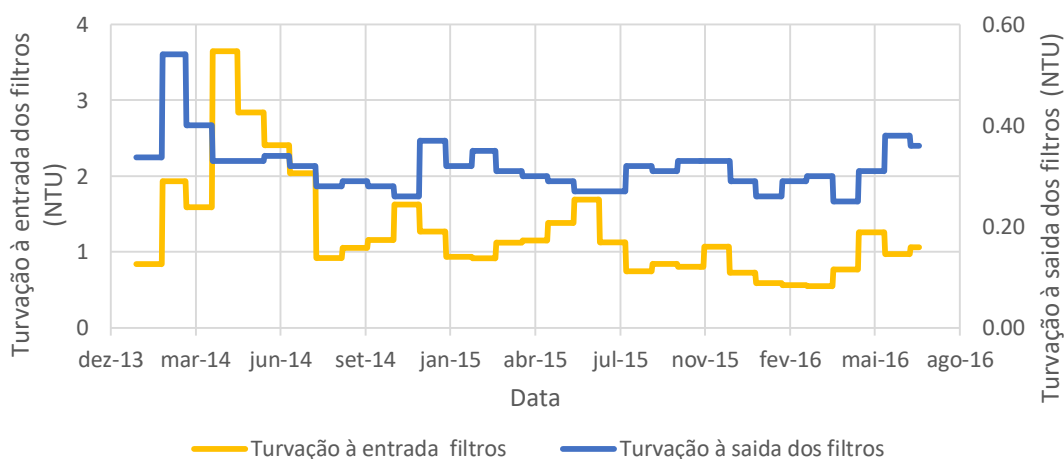


Figura 5.19 - Valores médios mensais de turvação da água a montante e jusante do sistema de filtração, ao longo do tempo

Tal como avaliado anteriormente, observa-se pela Figura 5.18, que a turvação da água à entrada dos filtros atinge valores na ordem dos 6 NTU, contudo, as médias mensais são bastante inferiores, variado entre 0,5 NTU e 3,5 NTU. Já a água filtrada teve uma variação média diária entre 0,3 NTU e 2,3 NTU, acabando por ter um valor médio bastante baixo, na ordem dos 0,32 NTU. Já em relação aos valores médios mensais, verifica-se que variam entre 0,3 NTU e 0,5 NTU.

A eficiência de remoção de turvação nos filtros, isto é, a diferença de turvação a montante e jusante deste órgão, encontra-se presente no Anexo III e resume-se na figura seguinte:

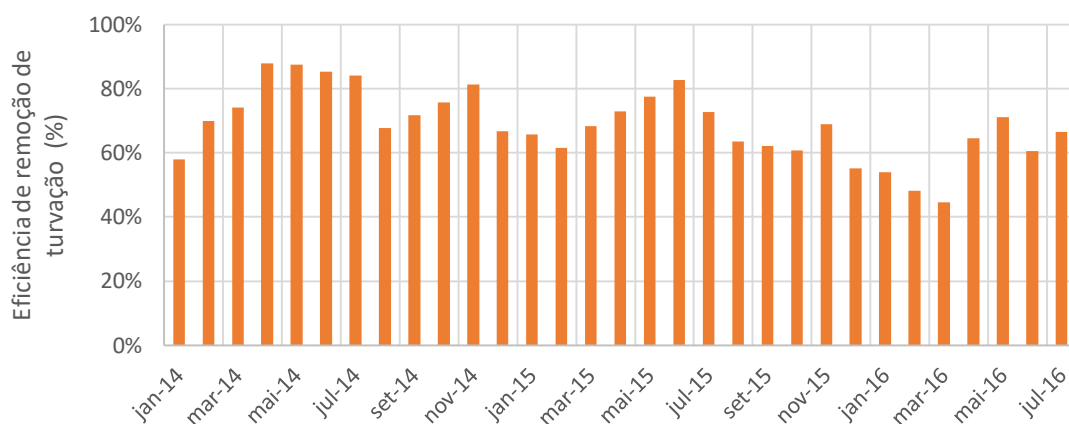


Figura 5.20 - Eficiência de remoção de turvação nos filtros ao longo dos meses em estudo

Da análise da Figura 5.20 verifica-se que a eficiência de remoção da turvação varia entre os 50% e os 90%, sendo superior nos meses de verão, o que coincide com os valores de turvação mais elevados à entrada dos filtros. Da análise das amostras apurou-se que o valor médio de remoção deste parâmetro está na ordem dos 68% o que denota um bom desempenho por parte desta etapa de tratamento.

Por forma a procurar ter uma visão mais global do processo de remoção da turvação ao longo da linha de tratamento, cruzou-se a informação relativa às amostras da água captada e as de montante e jusante da operação de filtração (Figura 5.21).

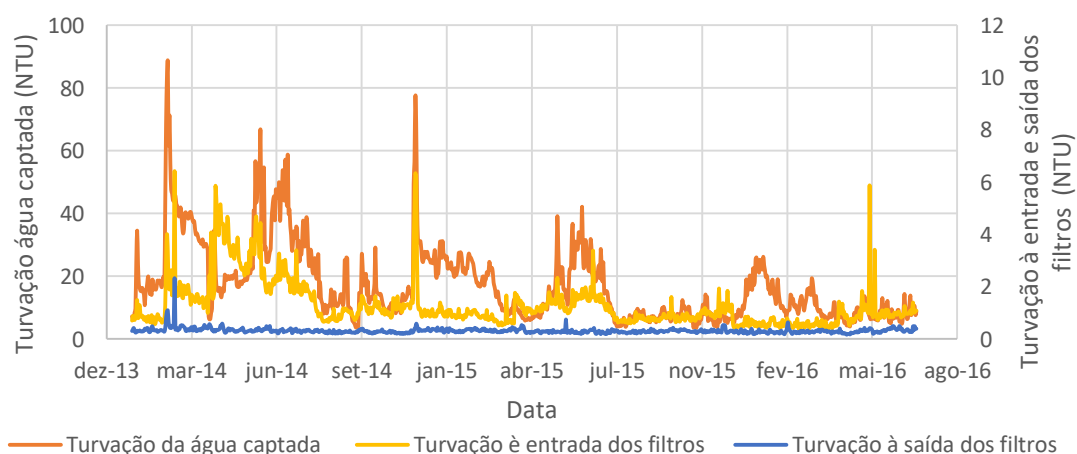


Figura 5.21 - Turvação da água captada, a montante e a jusante do sistema de filtração ao longo do tempo

Da análise da Figura 5.21 é possível verificar que valores elevados de turvação na água captada se repercutem, quase sempre, ao longo da linha de tratamento, o que parece denotar alguma limitação da linha para se adaptar a variações da qualidade da água, nomeadamente quando esta se apresenta uma qualidade inferior.

A Figura 5.22 permite analisar a eficiência media mensal de remoção do parâmetro da turvação a montante do sistema de filtração e nos próprios filtros.

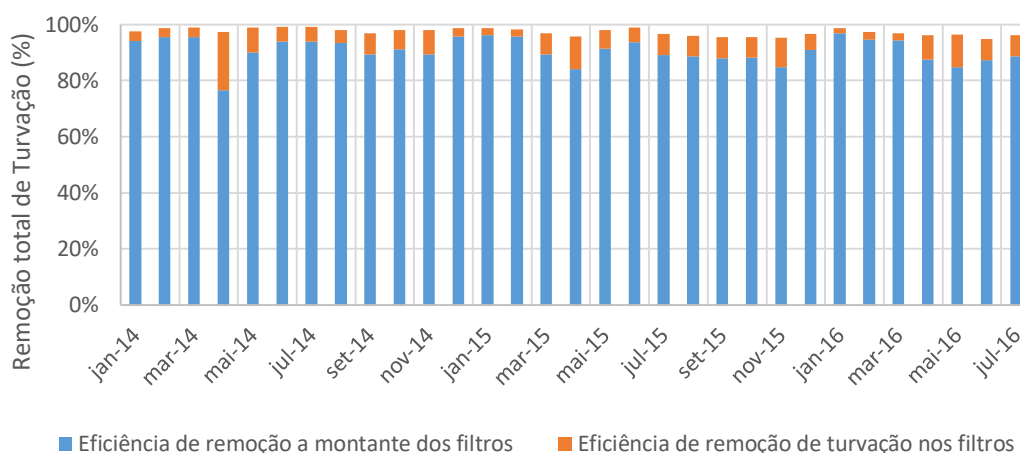


Figura 5.22 - Eficiência de remoção de turvação, ao longo dos meses em estudo

Verifica-se que grande parte da remoção da turvação é efetuada a montante do sistema de filtração, contudo, só a operação de filtração tem capacidade de remover a turvação até níveis de conformidade legal.

5.5. Análise da operação de lavagem dos filtros

Apesar do bom desempenho da etapa de filtração procurou avaliar-se a forma de operação destes órgãos, nomeadamente no que respeita ao número de lavagens que são efetuadas diariamente. Por forma a efetuar uma análise mais detalhada deste indicador elaborou-se um gráfico que resume o número médio diário de lavagens e o número médio mensal, ao longo do ano de 2015 (Figura 5.23).

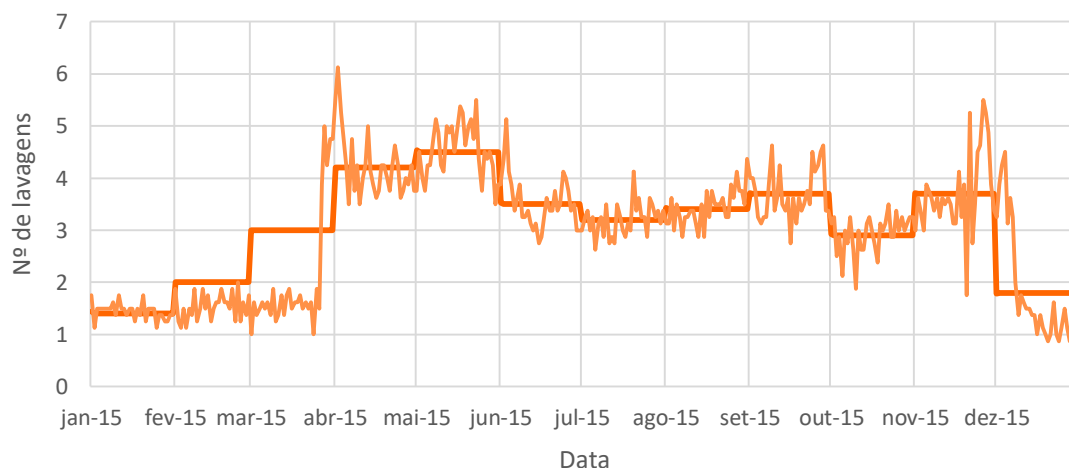


Figura 5.23 - Número médio diário e mensal de lavagens dos filtros ao longo do ano de 2015

Da análise da Figura 5.23, podemos avaliar que diariamente os filtros são lavados entre uma a seis vezes, já em termos mensais, o número de lavagens varia entre 1,5 e 4,5. É também de realçar a ocorrência de um aumento muito significativo de lavagens, de cerca de duas para quatro, entre o fim do mês de março e o início do mês de dezembro.

Por forma a procurar avaliar se este aumento brusco do número de lavagens esteve relacionado com o mau desempenho de determinado filtro, verificou-se qual o número médio diário de

lavagens em cada um dos filtros bem como o número de dias que cada um esteve fora de serviço ao longo do ano de 2015 (Figura 5.24).

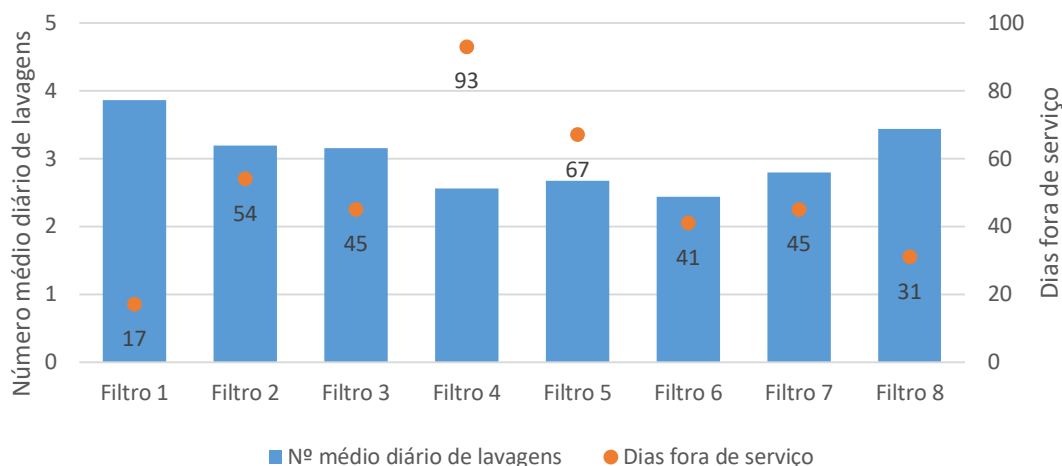


Figura 5.24 - Número médio diário de lavagens de cada filtro e número de dias que estes estiveram fora de serviço, no ano de 2015

Da análise da Figura 5.24 verifica-se que os filtros 1 e 8 foram lavados mais regularmente, ao invés os filtros 4 e 5 que foram lavados substancialmente menos vezes (cerca de 2,5 vezes). Esta variação parece estar relacionada com o número de dias que cada filtro esteve fora de serviço, uma vez que os filtros que estiveram menos tempo em obras tiveram um maior número médio de lavagens. Esta relação é verificada em todos os filtros com exceção do filtro 6, o que denota que este filtro provavelmente tem um desempenho superior aos restantes.

Não se justificando o aumento abrupto do número de lavagens pelo fraco desempenho de um determinado filtro, procurou relacionar-se o número médio diário de lavagens com a turvação à entrada do sistema de filtração (Figura 5.25 e Figura 5.26).

No final do mês de março entraram em funcionamento os flotadores (em alternativa aos decantadores), o que poderia justificar uma variação na qualidade da operação de separação sólido-líquido (pior qualidade), que se repercutisse na diminuição dos ciclos de filtração e, consequentemente, na necessidade de aumentar o número diário de lavagens, uma vez que de acordo com a informação disponibilizada pela AdLVT, o aumento de lavagens decorreu da diminuição dos ciclos de filtração, em consequência do aumento da perda de carga nos filtros.

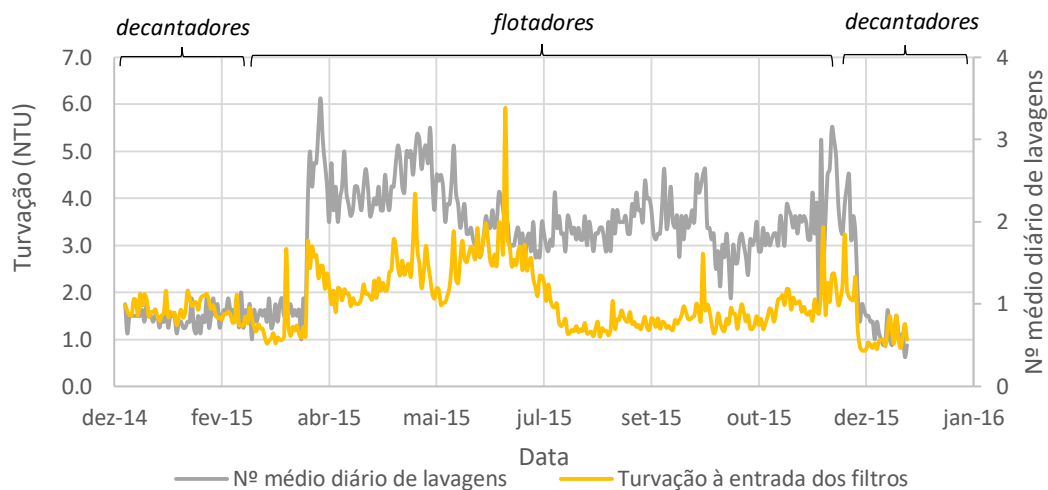


Figura 5.25 - Relação entre o número médio diário de lavagens dos filtros com a turvação à entrada dos filtros

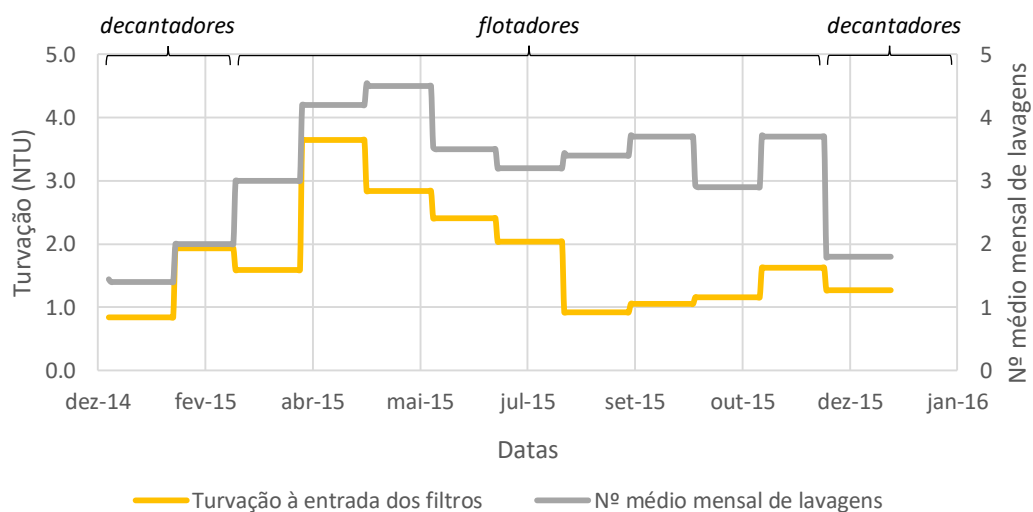


Figura 5.26 - Relação entre o número médio diário de lavagens, por mês, com a turvação à entrada dos filtros

Da análise das figuras acima não parece ser possível justificar tal assunção. De facto, a variação da qualidade da água (em termos de turvação), proveniente das operações de decantação ou flotação não é significativa e por si só não justifica o aumento do número de lavagens.

Cruzou-se, ainda, a informação relativa ao volume de água captada com o número de lavagens dos filtros (Figura 5.27).

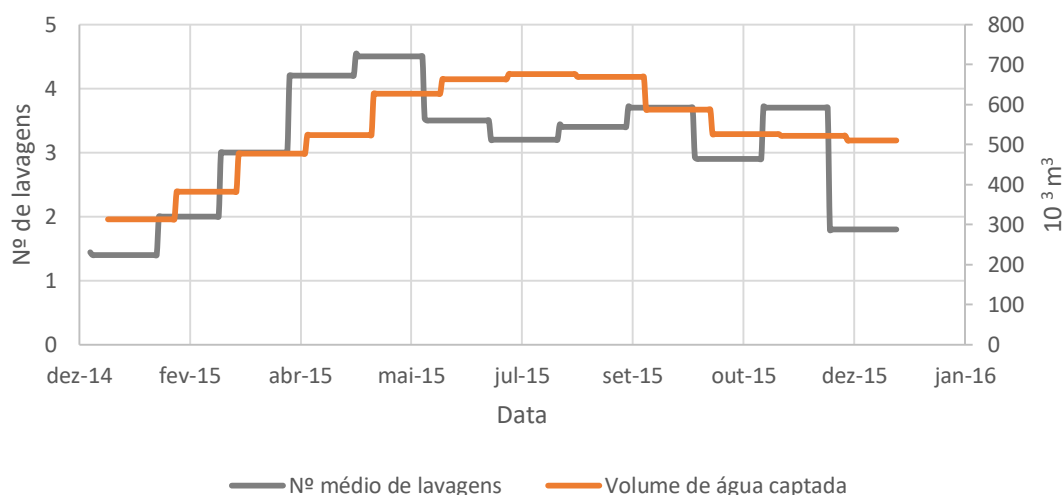


Figura 5.27 - Relação entre o volume de água captada e o número médio de diário de lavagens

Verifica-se que o aumento do número de lavagens parece corresponder ao aumento do volume de água captada, contudo, não é possível concluir que estejam diretamente relacionados uma vez que o período de tempo onde o volume de água captada foi superior não corresponde necessariamente ao período de tempo onde foram efetuadas mais lavagens aos filtros.

O trabalho de acampo realizado durante a semana de 11 a 16 de julho, de 2016, incluiu o acompanhamento da operação de lavagem do sistema de filtração, nomeadamente através da medição da turvação na água de lavagem dos filtros (com recurso a um turbidímetro). Foram realizadas duas medições em cada filtro, à exceção das realizadas nos filtros 1, 2 e 7 onde foi possível realizar a medição em três lavagens distintas.

Os principais resultados são apresentados nas figuras seguintes, estando as tabelas que suportam os gráficos presentes em anexo. Para cada um dos filtros e para cada uma das etapas de lavagem foram elaborados gráficos de turvação em função do tempo.

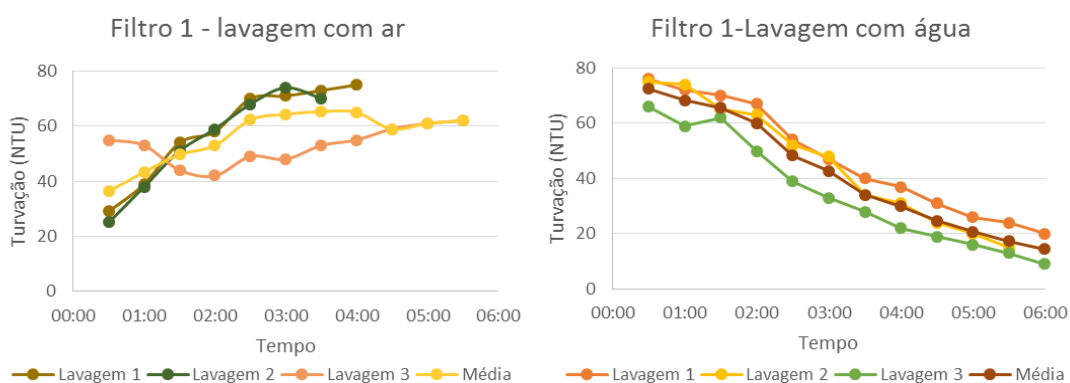


Figura 5.28 - Turvação em função do tempo ao longo das fases de lavagem dos filtros com ar e água (continua)

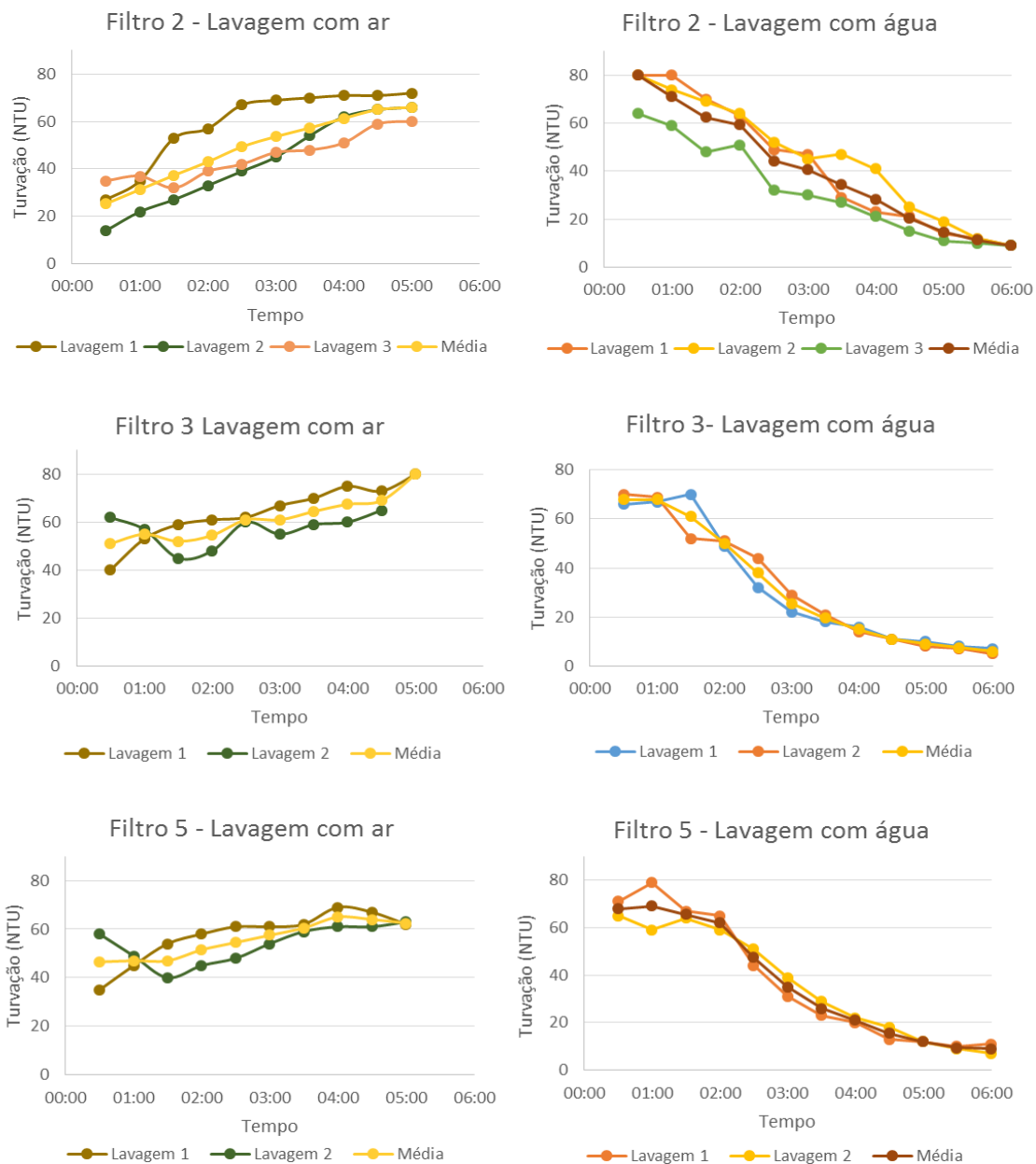


Figura 5.28 - Turvação em função do tempo ao longo das fases de lavagem dos filtros com ar e água (continua)

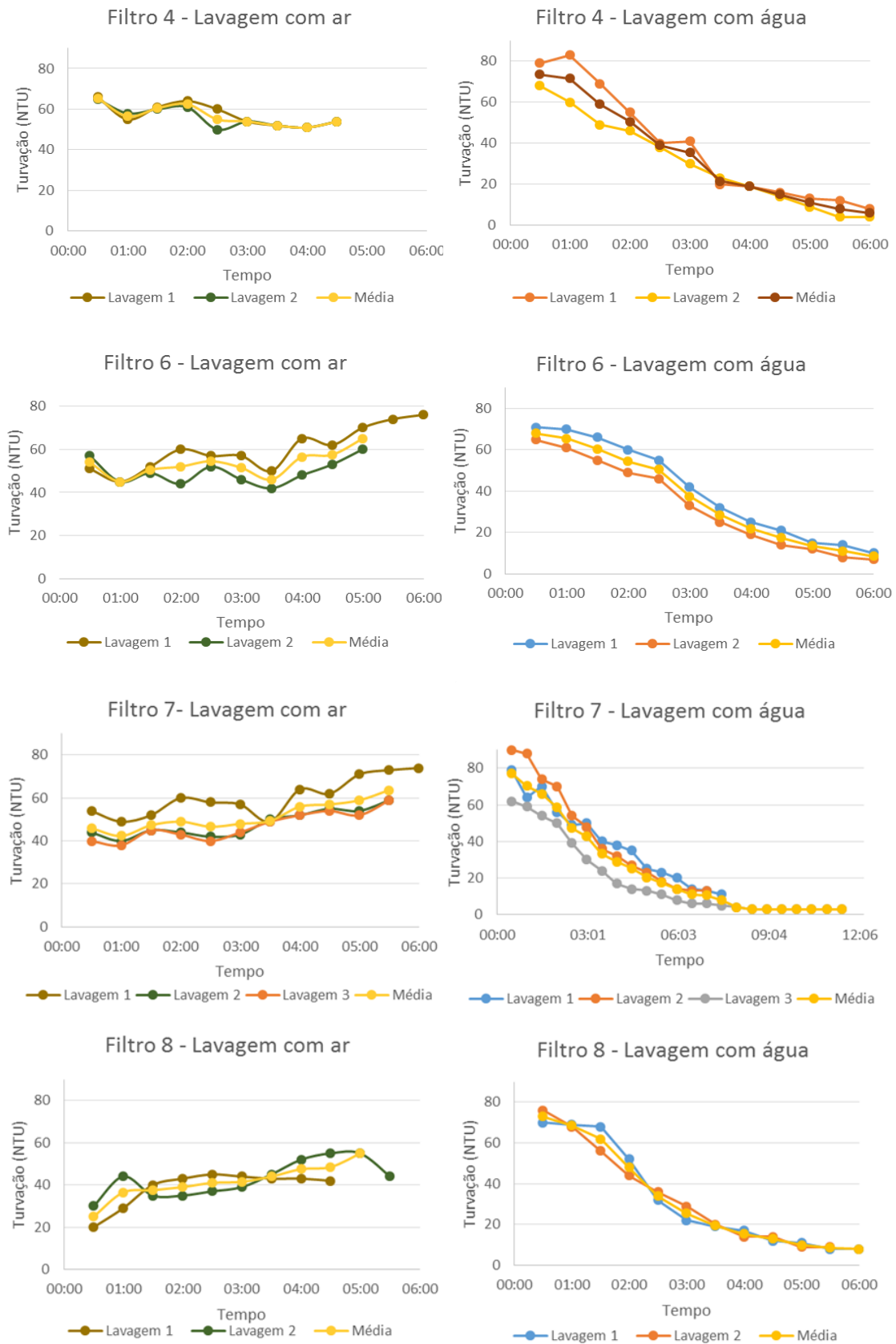


Figura 5.28 – Turvação, em função do tempo, ao longo das fases de lavagem dos filtros com ar e água (continua)

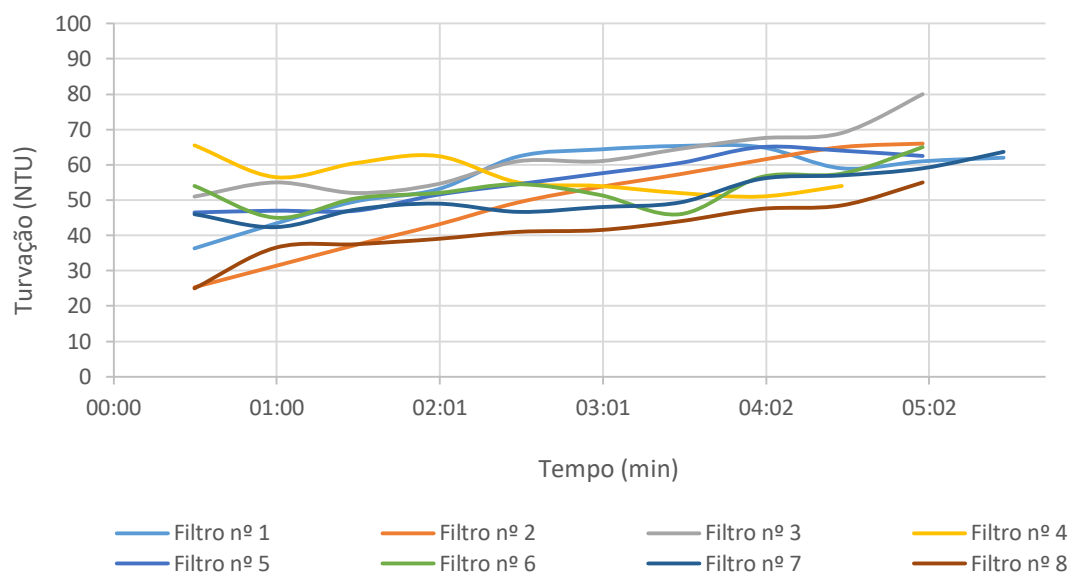


Figura 5.29 - Turvação média durante a fase de lavagem com ar em cada um dos filtros

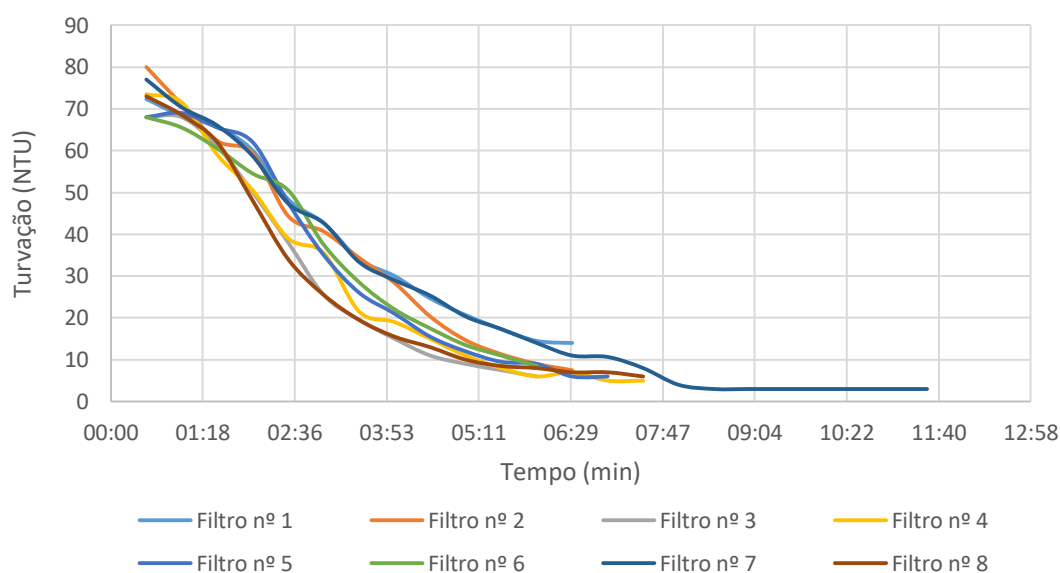


Figura 5.30 – Turvação média durante a fase de lavagem com água em cada um dos filtros

Em primeira análise é possível concluir que esta operação é efetivamente composta por duas etapas, sendo a primeira efetuada com ar, durante um período de cerca de 5 minutos e a segunda com água durante 6 minutos, sensivelmente.

Da análise da primeira fase de lavagem dos filtros (lavagem com ar) verifica-se que a turbidez vai aumentando ligeiramente ao longo do tempo, até perto dos 80 NTU. Relativamente à fase de lavagem com água, a turbidez vai diminuindo até valores que variam entre os 5 UNT e os 10 UNT.

No filtro 7, em que a lavagem 3 foi prolongada no tempo, de uma forma não programada, verifica-se que ocorre um decréscimo na turbidez nos minutos iniciais desse prolongamento após o que, o valor estabiliza.

De modo a avaliar a turvação da água à saída dos filtros, no início de cada ciclo de filtração, foi realizada uma amostragem da turvação (Figura 5.31) em dois filtros (filtro 3 e filtro 6).

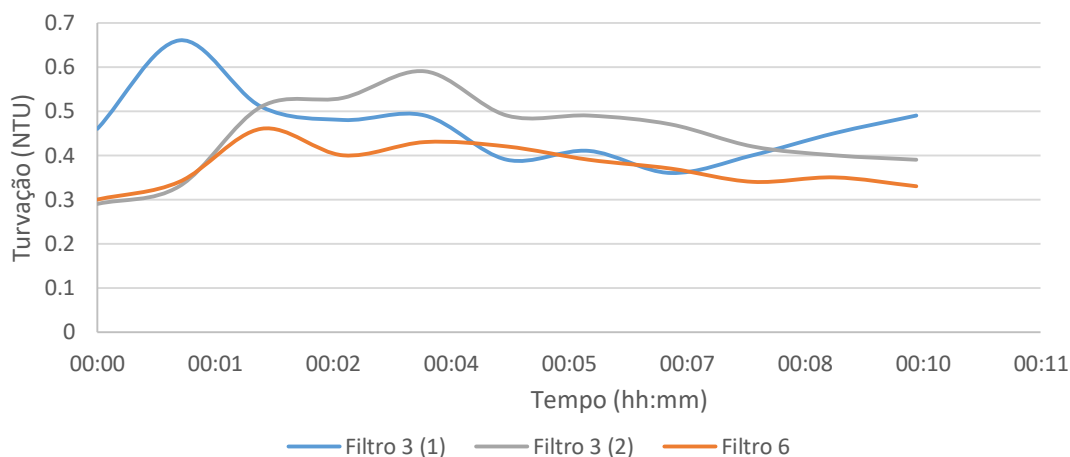


Figura 5.31 - Turvação da água à saída dos filtros 3 e 6

Pela análise da figura anterior verifica-se que após a entrada dos filtros em funcionamento, a turvação da água filtrada é sempre inferior a 1 NTU, variando entre os 0,3 NTU e os 0,7 NTU.

5.6. Caracterização do atual método de lavagem dos filtros

A etapa de filtração na ETA de Monte Novo está equipada com um sistema de filtração composto por oito filtros, com uma área unitária de 14,58 m², o que corresponde a uma área total de filtração de 116,64 m².

A operação de lavagens dos filtros é constituída por duas etapas, sendo a primeira realizada com recurso à injeção de ar no meio filtrante durante 5 min., já a segunda é efetuada exclusivamente com água e tem uma duração de cerca de 6 minutos.

O ar é injetado nos filtros através de dois supressores, com uma potência de 12 kW, equipados com variador de frequência, com uma capacidade de produção unitária de 900 m³/h. Contudo, estes supressores são utilizados em paralelo, sendo cada um destes destinado a quatro filtros distintos.

A velocidade de lavagem com ar aplicada é de cerca de 62 m/h considerando que o caudal de ar injetado é de 900 m³/h, O que está de acordo com a bibliografia, que refere que fluxo de ar necessário deverá variar entre os 50 e 80 m/h.

A bombagem da água utilizada na operação de lavagem em contracorrente é efetuada com recurso a dois grupos eletrobomba, com uma potência nominal unitária de 11 kW e com capacidade unitária de bombagem de 230 m³/h, aproximadamente.

A velocidade de lavagem da etapa com água é na ordem dos 29 m/h admitindo que o caudal de água aplicado é de 420 m³/h. Também de acordo com a bibliografia acima referida, o fluxo de água necessário deverá variar entre os 10 e 30 m/h, estando por isso este parâmetro no limite superior recomendado.

No entanto, por forma a avaliar estes valores, deve-se efetuar a determinação da velocidade de fluidização experimentalmente, com recurso a um filtro piloto que repercuta as condições exatas dos filtros em estudo.

Em termos de consumo de água de lavagem, a metodologia de lavagem dos filtros em vigor requer o uso das duas bombas durante um período de cerca de 6 minutos. Tendo em conta que estando ambas as bombas em funcionamento o caudal bombado é de cerca de 420 m³/h, verifica-se que o consumo desta etapa de lavagem é de 42 m³, por lavagem.

Considerando que, em média, os oito filtros são lavados três vezes por dia (valor do ano de 2015), estima-se um consumo diário de 1008 m³ o que corresponde a um volume anual de 367 920 m³ o que representa cerca de 6% da água captada. No entanto, de acordo com a bibliografia, este indicador deveria estar na ordem dos 2%.

Em relação ao consumo de energia elétrica desta operação, verifica-se que está associado fundamentalmente aos compressores e às bombas. Contudo, também é relevante analisar que a água utilizada nesta operação já foi previamente bombada, na captação, o que acarreta custos substanciais.

As características dos equipamentos eletromecânicos utilizados na operação de lavagem dos filtros estão resumidas na tabela abaixo.

Tabela 5.4 - Potência das bombas e compressores utilizados na lavagem dos filtros

Potência dos compressores	Unidade	RB001A	RB001B
	kW	7,5*	7,5*
Potência das bombas	Unidade	VP001A	VP001B
	kW	9,5**	9,5**

*a uma frequência de 40 Hz

**Potência medida

A desagregação dos consumos energéticos associados à operação de lavagem dos filtros é apresentada na Tabela 5.4 e Figura 5.32.

Tabela 5.5 - Desagregação dos consumos energéticos de uma lavagem

	Unidade	Valor
Consumo dos compressores	kWh	0,63
Consumo das bombas	kWh	1,90
Consumo de uma lavagem	kWh	2,53
Volume de água gasta numa lavagem	m ³	42,00
Energia gasta na bombagem da água de lavagem	kWh	5,02
Consumo total de uma lavagem	kWh	7,55
Custo de uma lavagem	€	0,83

*considerando o valor de 0,11€ por kWh

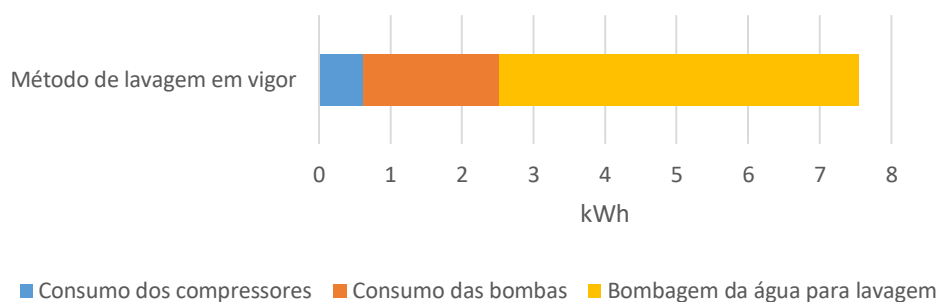


Figura 5.32 - Desagregação dos consumos energéticos de uma lavagem

Da análise da figura anterior verifica-se que a maior exigência energética é referente à bombagem da água (aquando da captação) para posterior lavagem dos filtros, seguida das bombas para lavagem dos filtros em contracorrente e por fim os compressores.

Considerando que em média os oito filtros são lavados três vezes por dia, estima-se que o consumo diário seja de 181,08 kWh o que corresponde a 66 095 kWh/ano, o que representa cerca de 14% da energia gasta no tratamento da fase líquida.

A operação de lavagem dos filtros representa um custo diário de 19,92 € (7 270 € ano).

Se consideramos a possível redução do número médio de lavagens para duas por dia, a poupança seria na ordem dos 1 940€ anuais, o que representa uma redução de 33%.

5.7. Alteração do método de lavagem dos filtros

5.7.1. Descrição sumária

Entre as várias possibilidades de alteração do método de lavagem dos filtros, acabaram por ser estudadas duas destas possibilidades. A primeira consistiu em manter as atuais condições de lavagem, isto é, uma primeira etapa só com ar e uma segunda só com água, prolongando a etapa de lavagem só com água por um período de 5 minutos, de modo a avaliar se a qualidade da água filtrada melhorava e se o ciclo de filtração seria mais longo.

A segunda alteração consistiu na introdução de uma fase lavagem intermédia com ar e água, passando este método a ser composto por três fases com a duração de 3 minutos cada, o que permitiria reduzir o consumo energético da operação bem como o volume de água lavagem necessário comparativamente à atual sequência de lavagem.

5.7.2. Aumento do tempo de fase de lavagem só com água (5+11)

Esta alteração tinha como principal objetivo contribuir para uma melhor lavagem, por forma a procurar aumentar o ciclo de filtração, o que permite uma diminuição do número de lavagens. Esta modificação visava, igualmente, melhorar a qualidade da água filtrada.

A alteração do método de lavagem foi efetuada em dois filtros distintos (filtro 3 e filtro 6) pertencendo cada um destes a uma bateria de filtros diferente. Apesar da alteração ter como objetivo tornar os ciclos de filtração mais longos esta hipótese não se verificou, uma vez que os

filtros sujeitos a esta alteração continuaram a ter ciclos na ordem das 5 horas e 30 minutos o que acaba por ser semelhante ao método de lavagem em vigor. Contudo, é de referir que apenas foram realizados quatro ensaios, o que pode não ser conclusivo.

A análise da turvação à saída dos filtros nos primeiros 10 minutos do ciclo de filtração (Figura 5.33 e Figura 5.34) bem como ao longo do ciclo de filtração (Figura 5.35), estão representados nas figuras seguintes tal como os respetivos ensaios “testemunha”:

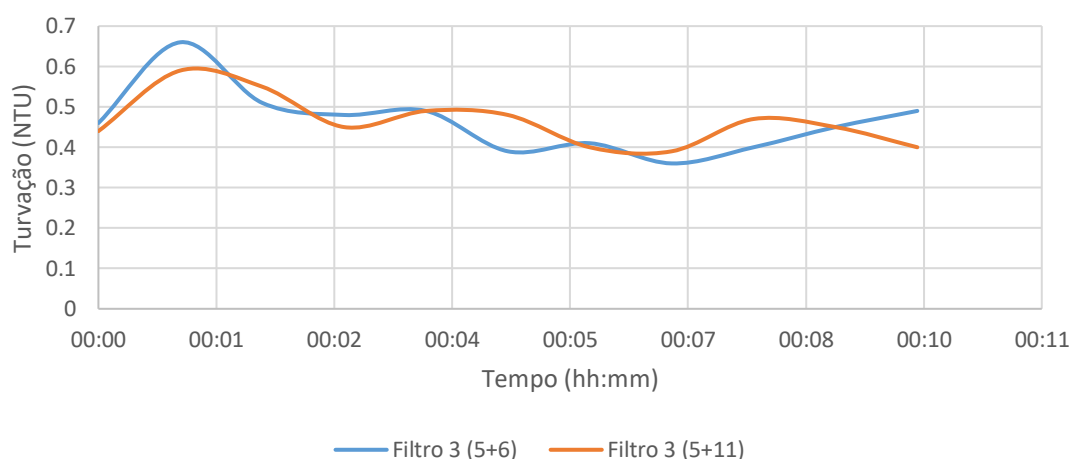


Figura 5.33 - Análise da turvação à saída do filtro 3 para cada um dos métodos de lavagem (durante os primeiros 10 minutos do ciclo de filtração)

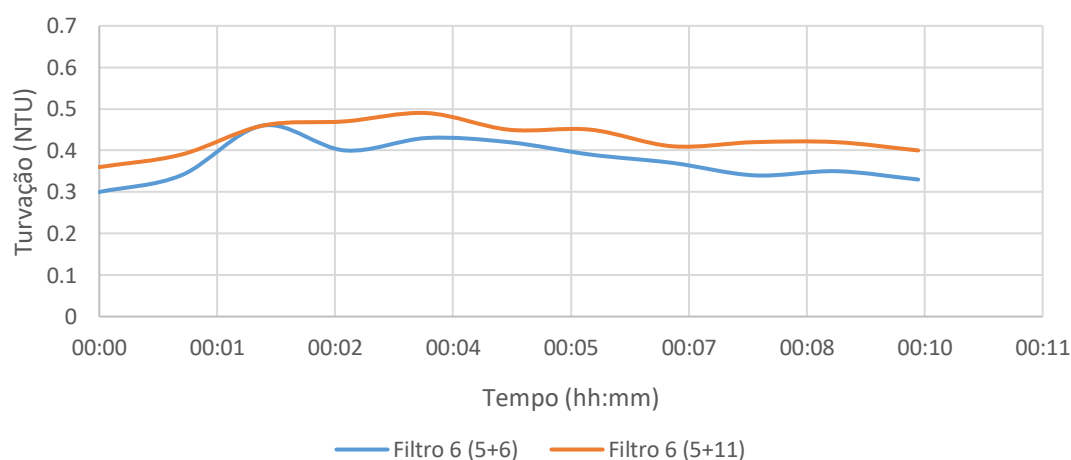


Figura 5.34 - Análise da turvação à saída do filtro 6 para cada um dos métodos de lavagem (durante os primeiros 10 minutos do ciclo de filtração)

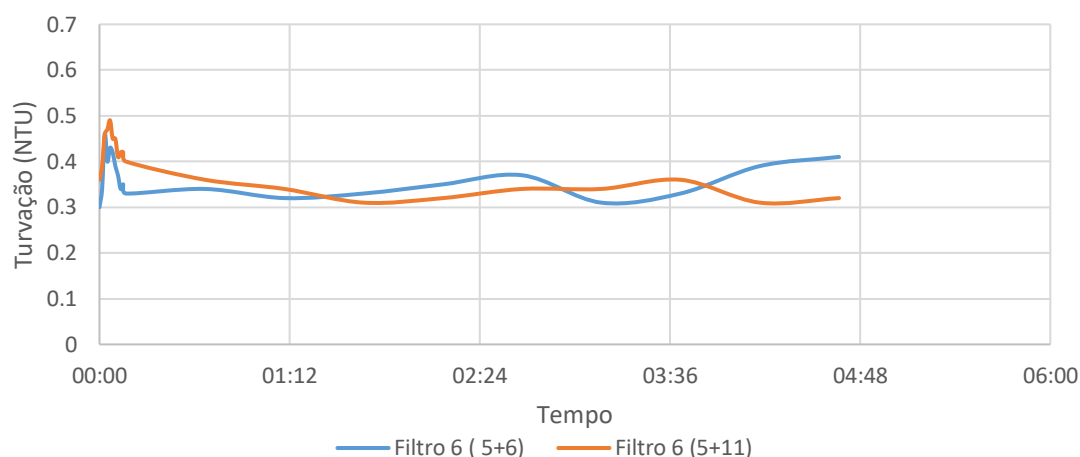


Figura 5.35 - Análise da turvação à saída do filtro 6 para cada um dos métodos de lavagem (durante as primeiras 4 horas do ciclo de filtração)

Da análise da Figura 5.33 e Figura 5.34, verifica-se que a turvação da água filtrada durante os primeiros 10 minutos de cada ciclo de filtração varia entre os 0,3 NTU e os 0,7 NTU sem que haja uma diferença representativa entre os dois métodos de lavagem. É de realçar ainda que inicialmente a turvação é mais baixa, subindo ligeiramente nos minutos iniciais (principalmente no filtro 3), acabando por descer ao longo do tempo apesar de ser de uma forma bastante ténue, estabilizando entre os 0,3 NTU e os 0,4 NTU.

A Figura 5.35 ilustra de uma forma mais global o ciclo de filtração uma vez que foram efetuadas amostras de minuto a minuto, durante os primeiros 10 minutos do ciclo de filtração e de 30 em 30 minutos durante o restante período de tempo. Tal como observado anteriormente, a turvação tem valores mais elevados nos períodos iniciais acabando por estabilizar com o decorrer do tempo.

É de salientar igualmente, que a alteração para este método exige um maior volume de água (de 42 m³ para 77 m³) e ainda consumos energéticos mais elevados como ilustrado na figura seguinte.

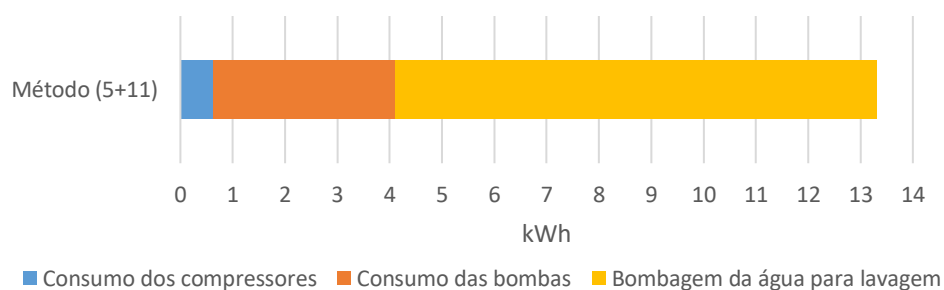


Figura 5.36 - Desagregação dos consumos energéticos de uma lavagem

5.7.3. Introdução da fase intermédia com ar e água (3+3+3)

Esta modificação do método de lavagem dos filtros tinha como principal objetivo a diminuição dos consumos energéticos desta operação bem como o volume de água necessário, sem nunca por em causa a qualidade da água filtrada.

Este método inclui um total de três etapas de 3 minutos, cada uma, sendo a primeira realizada exclusivamente com ar, a segunda com ar e água e a terceira e última apenas com água.

Na primeira etapa, o ar foi injetado nos filtros através do supressor dedicado, a uma frequência de 40 Hz, tendo uma capacidade de produção na ordem dos 900 m³/h. Na segunda etapa, que inclui ar e água em simultâneo, a frequência do supressor foi reduzida para os 30 Hz sendo utilizada apenas uma bomba com capacidade na ordem dos 230 m³/h. A última etapa consistiu em lavar os filtros apenas com água, com recurso às duas bombas, que têm capacidade para injetar no meio filtrante cerca 420 m³/h.

Um das preocupações inerentes à realização destes ensaios esteve associado à possibilidade do leito filtrante ser arrastado durante a fase de lavagem intermédia. Contudo, nos ensaios realizados tal não aconteceu.

A alteração do método de lavagem foi efetuada em dois filtros (filtro 2 e filtro 7) pertencendo cada um destes a uma bateria de filtros diferente. A análise da turvação da água à saída dos filtros nos primeiros 15 minutos do ciclo de filtração é apresentada nas figuras seguintes:

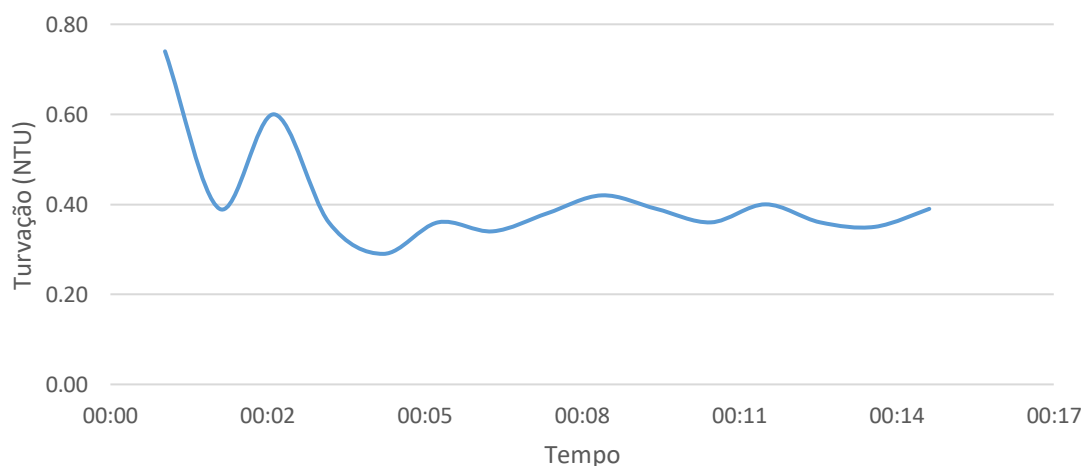


Figura 5.37 - Análise da turvação da água à saída do filtro 2

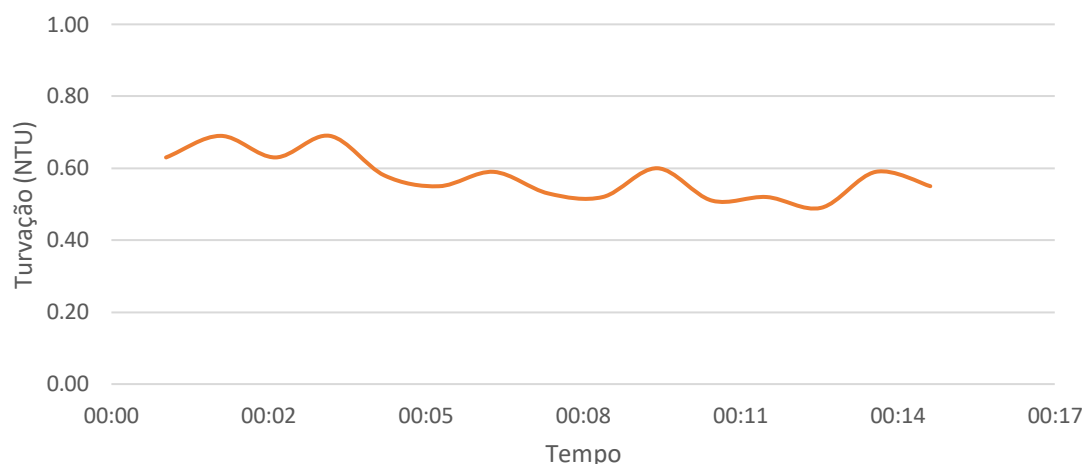


Figura 5.38 - Análise da turvação da água à saída do filtro 7

Pela análise das figuras anteriores verifica-se que, a turvação é sempre inferior a 0,9 NTU, sendo ainda possível apurar que nos momentos iniciais a turvação sobe, acabando por voltar a descer até valores na ordem dos 0,4 NTU no filtro 2 e 0,5 NTU no filtro 7.

Nesta etapa intermédia a velocidade de lavagem com ar aplicada é de 46,3 m/h considerando que o caudal de ar injetado é de 675 m³/h (valor obtido através de uma relação linear da alteração da frequência dos 40 Hz para os 30 Hz). Em relação à velocidade de lavagem com água, esta é de cerca de 15,8 m/h assumindo que o caudal de água aplicado é de 230 m³/h.

Em termos de consumos de água, esta metodologia requer o uso de uma das bombas durante 3 minutos e das duas em simultâneo também durante 3 minutos. Estando apenas um das bombas em funcionamento o caudal é de cerca de 230 m³/h e no período em que estão ambas a trabalhar o caudal bombado é de 420 m³/h, pelo que o consumo desta etapa de lavagem é de 32,5 m³, por lavagem.

Considerando a necessidade dos oito filtros serem lavados três vezes por dia estima-se que haja um consumo diário de 780 m³ materializando-se em 284 700 m³ por ano, o que representa cerca de 5% da água captada.

Em termos de consumos energéticos, estes são maioritariamente associados aos compressores, às bombas e, também à água de lavagem dos filtros previamente bombada, como referido anteriormente.

Na Tabela 5.6 resume-se as características dos equipamentos eletromecânicos.

Tabela 5.6 - Potência das bombas e compressores no período de lavagem dos filtros

Potência dos compressores	Unidade	RB001A	RB001B
	kW	7,5*	7,1**
Potência das bombas	Unidade	VP001A	VP001B
	kW	9,5	9,5

*a uma frequência de 40 Hz

**a uma frequência de 30 Hz

Os consumos energéticos associados a este método de lavagem resumem-se na Tabela 5.7 e Figura 5.39.

Tabela 5.7 - Desagregação dos consumos energéticos de uma lavagem

	Unidade	Valor
Consumo dos compressores	kWh	0,73
Consumo das bombas	kWh	1,43
Consumo de uma lavagem	kWh	2,16
Volume de água gasta numa lavagem	m ³	32,50
Energia gasta na bombagem da água de lavagem	kWh	3,88
Consumo total de uma lavagem	kWh	6,04
Custo de uma lavagem	€	0,66

**considerando o valor de 0,11€ por kWh*

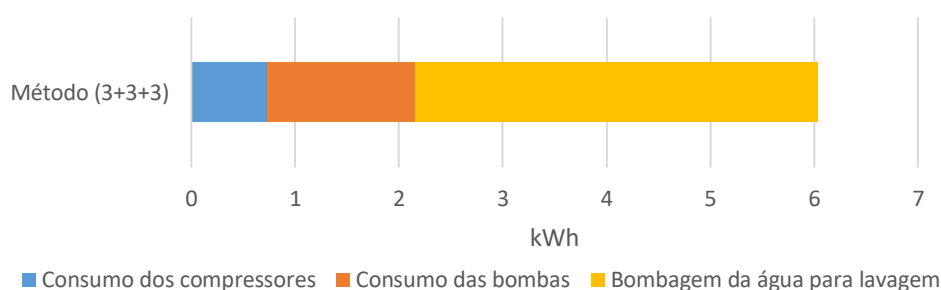


Figura 5.39 - Desagregação dos consumos energéticos de uma lavagem

Verifica-se assim que a maior exigência energética continua a estar associada à bombagem da água para posterior lavagem dos filtros, seguida das bombas e por fim os compressores.

Considerando que cada um dos filtros é lavado três vezes por dia, estima-se que haja um consumo diário de 144,95 kWh o que corresponde a 52 906 kWh por ano.

Em termos financeiros, a lavagem dos filtros representa um custo diário de 15,94 € (5 820 € ano).

5.8. Comparação dos métodos de lavagem dos filtros

Considerando que a proposta de alteração ao método que consiste em prolongar a etapa de lavagem exclusivamente com água não permite trazer benefícios evidentes, compara-se o método que introduz uma etapa intermédia com ar e água com o método de lavagem atualmente em vigor.

Em termos de qualidade da água filtrada:

A comparação do parâmetro, turvação da água filtrada, para ambos os métodos de lavagem é efetuada nas figuras seguintes, sendo que para o método em vigor a amostragem foi realizada nos primeiros 10 minutos do ciclo de filtração e para o método (3+3+3) a amostragem decorreu nos primeiros 15 minutos do ciclo.

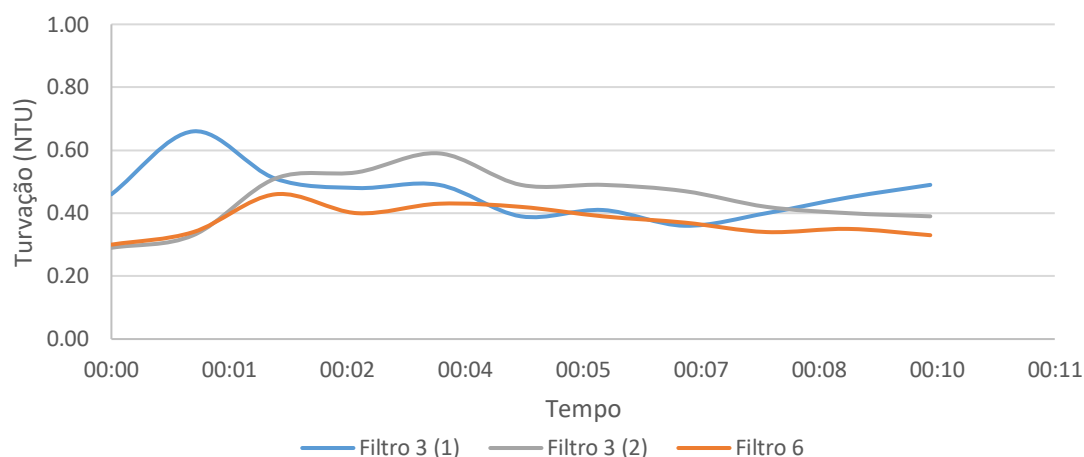


Figura 5.40 - Análise da turvação da água filtrada, nos filtros lavados com o método em vigor

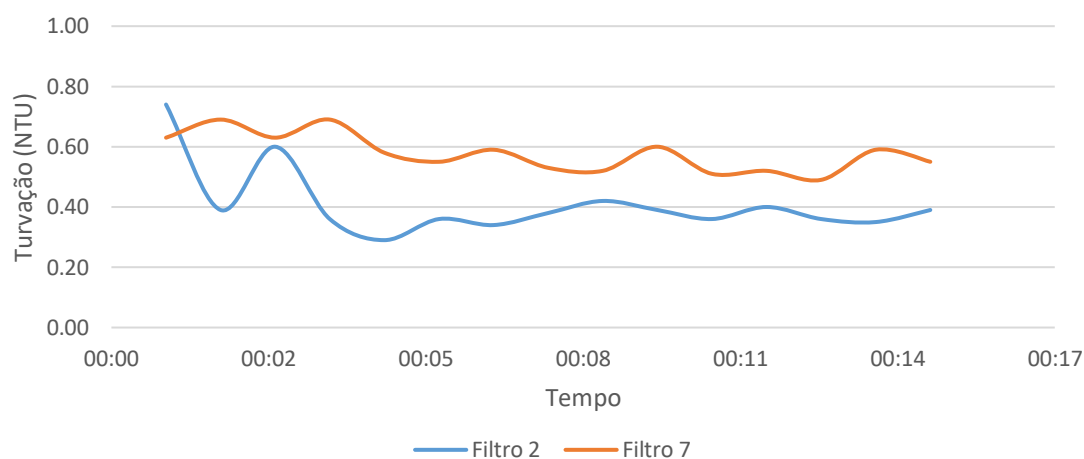


Figura 5.41 - Análise da turvação da água filtrada, nos filtros lavados com o método (3+3+3)

Da análise das figuras anteriores verifica-se que os valores de turvação são semelhantes, não havendo diferenças significativas.

Em termos de volume de água:

A Figura 5.42 ilustra a necessidade de água para lavagem dos filtros para cada um dos métodos de lavagem dos filtros.

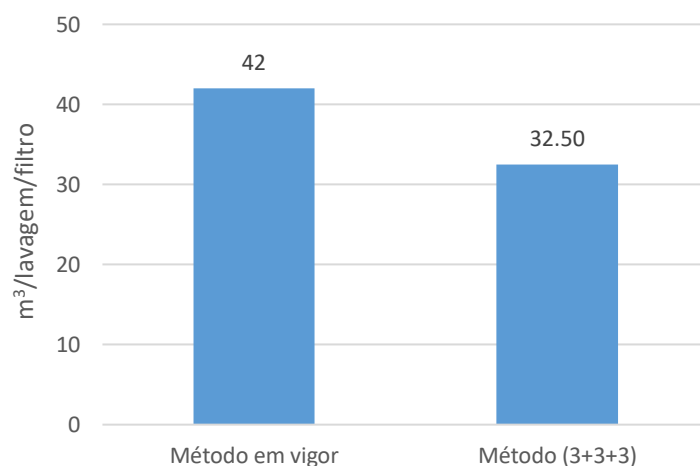


Figura 5.42 - Comparação entre os métodos de lavagem dos filtros, em termos de consumo de água

Verifica-se que a diferença de volume de água entre os dois métodos é de cerca 9,5 m³ por lavagem. Esta diferença corresponde a 83 220 m³ anuais, considerando que os filtros continuam a ser lavados em média 3 vezes por dia, o que equivale a cerca de 5 dias de produção.

Em termos de energia elétrica:

A Figura 5.43 ilustra a diferença entre as necessidades energéticas para cada um dos métodos de lavagem dos filtros.

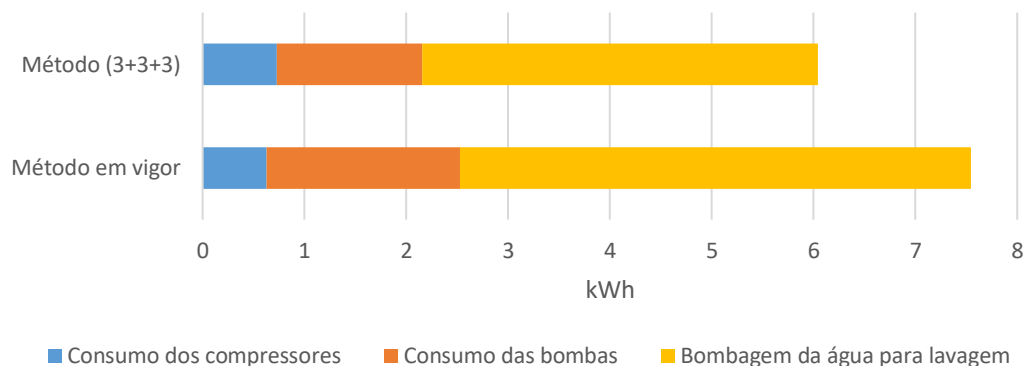


Figura 5.43 - Comparação entre os métodos de lavagem dos filtros, em termos de consumo energético

Comparando ambos os métodos relativamente às necessidades energéticas verifica-se que o método em vigor exige mais 1,5 kWh por lavagem. Esta diferença substancial deve-se à maior necessidade de água por parte do método em vigor, o que se repercute nos consumos energéticos relativos à bombagem de água para lavagem.

Esta diferença representa cerca de 20%, isto é, cerca de 13 188 kWh anuais, se consideramos que os oito filtros continuam a ser lavados em média 3 vezes por dia.

Se analisarmos o quociente entre a energia necessária para lavar os filtros e o volume de água captada verificamos que o método em vigor necessita de 0,010 kWh/m³ e o método (3+3+3)

necessita de 0,008 kWh/m³. De salientar que ambos os valores se encontram no intervalo referido pela bibliografia, que se situa entre 0,005 e 0,014 kWh/m³.

Em termos financeiros:

A Figura 5.44 representa a diferença entre os custos de cada um dos métodos de lavagem dos filtros, por lavagem.

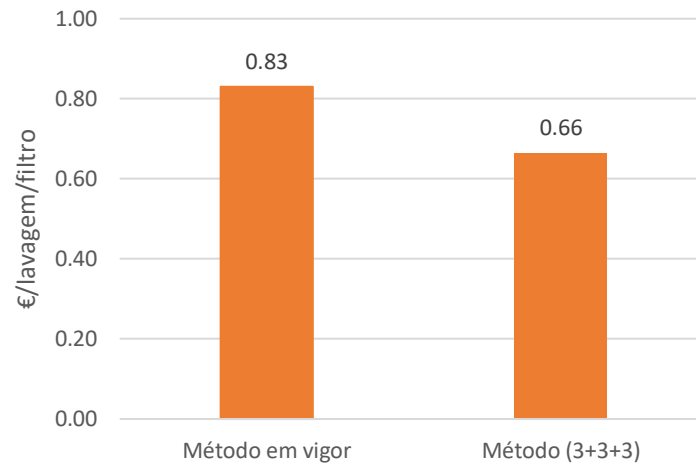


Figura 5.44 - Comparação entre os métodos de lavagem dos filtros, em termos financeiros

Comparando os resultados obtidos verifica-se que o método em vigor tem um custo de 0,83€ por lavagem, superior ao obtido pelo método (3+3+3) que tem um custo na ordem dos 0,66€. Assim a alteração para este método permitiria uma poupança de 0,17€ por lavagem.

Esta poupança de 20% corresponde a valores na ordem dos 3,98 € por dia (1 451 € anuais), se mais uma vez considerarmos que os oito filtros continuam a ser lavados em média três vezes por dia.

6. Conclusões

Do acordo com o trabalho efetuado, as principais conclusões incluem:

- Dos valores paramétricos analisados, relativamente à qualidade da água bruta, o manganês foi o único que ultrapassou o valor estabelecido por lei, tendo esta situação ocorrido apenas duas vezes em todo o período de amostragem;
- A remoção da turvação é, em grande parte, efetuada a montante do sistema de filtração. Contudo, só os filtros têm capacidade de remover a turvação até aos níveis de conformidade legal;
- A eficiência de remoção da turvação na etapa de filtração varia entre os 50% e os 90%, sendo superior nos meses de verão, coincidindo com os valores de turvação mais elevados à entrada dos filtros;
- O número médio de lavagens dos filtros aumenta de cerca de duas lavagens por dia para quatro aquando da alteração da operação de sedimentação, dos flotadores para os decantadores;
- Esta alteração por si só não parece justificar o aumento do número de lavagens, uma vez que a turvação da água afluenta aos filtros não apresenta uma diferença significativa. No entanto, a alteração de operação coincide igualmente com o período do ano onde existe necessidade de produzir mais água. Deste modo, o aumento do número de lavagens poderá estar relacionado com estes dois fatores;
- Da análise do método de lavagem em vigor, verifica-se que na fase de lavagem com ar a turvação vai aumentando ao longo do tempo, até perto dos 80 NTU. Relativamente à fase de lavagem com água, a turvação vai diminuindo durante o decorrer desta operação, até valores que variam entre os 5 UNT e os 10 UNT;
- O método de lavagem atualmente empregue requer de 42 m³, por lavagem e por filtro. Estima-se que a nível energético, uma lavagem esteja associada a um consumo 7,55 kWh, o que representa, anualmente, cerca de 14% da energia consumida no tratamento da fase líquida, se se admitir que os oito filtros são lavados em média três vezes por dia;
- A alteração ao método de lavagem, que consistiu no prolongamento da fase de lavagem com água em 5 minutos, não traz benefícios evidentes, uma vez que esta alteração não permite prolongar os ciclos de filtração e exige um maior volume de água, bem como consumos energéticos mais elevados;
- A introdução de uma fase intermédia com ar e água não altera a qualidade da água filtrada;
- Esta alteração permite a poupança de 9,5 m³ de água por lavagem, o que equivale a cerca de 5 dias de produção;
- Em termos energéticos, esta alteração ao método em vigor permite reduzir 1,5 kWh por lavagem, o que equivale a 20%;

- Esta diferença deve-se à maior necessidade de água por parte do método em vigor, o que se repercute nos consumos energéticos relativos à bombagem de água para lavagem;
- Esta alteração poderá constituir uma alternativa ao atual método de lavagem.

7. Desenvolvimentos futuros

Por forma a aprofundar o estudo efetuado teria interesse desenvolver os seguintes aspetos:

- Detalhar as características dos filtros em estudo, nomeadamente a sua profundidade e a granulometria do meio de filtração através de indicadores como o diâmetro efetivo (D_E), coeficiente de uniformidade (C_U), esfericidade (ψ) e porosidade (ϵ);
- Avaliar os valores de perda de carga em cada filtro, procurando analisar a razão deste parâmetro apresentar diferenças substanciais aquando da alteração da operação de sedimentação, dos decantadores para os flotadores;
- Tendo em conta que a filtração é mais eficiente quando a operação de sedimentação é realizada pelos decantadores, uma vez que necessitam de ser lavados um menor número de vezes, seria de considerar estudar a efetiva necessidade de alteração para os flotadores;
- Seria ainda desejável repetir os ensaios relativos às alterações propostas ao método de lavagem dos filtros por forma a avaliar a capacidade de resposta a diferentes condições de qualidade de água a filtrar;
- Em última análise seria interessante poder simular o funcionamento dos filtros, através do recurso a ensaios piloto e, deste modo encontrar um método de lavagem mais eficiente.

8. Referências bibliográficas

- Adelman, M., Weber-Shrink, M., Cordero, A., Coffey, S., Maher, W., Guelig, D., . . . Lion, L. (2012). *Stacked Filters: Novel Approach to Rapid Sand Filtration*. American Society of Civil Engineers.
- AdLVT - Águas de Lisboa e Vale do Tejo. (Julho de 2016). Obtido de <http://adlvt.pt>
- AdP – Águas de Portugal. (Maio de 2016). Obtido de <http://www.adp.pt>
- AEA. (2015). *Viver num clima em mudança*. Copenhaga: Serviço das Publicações da União Europeia.
- Almeida, M. (2005). *Contribuição para o estudo da avaliação de instalações de tratamento de águas. Desenvolvimento de um algoritmo de cálculo automático*. Dissertação de Doutoramento da Faculdade de Ciências da Universidade Nova de Lisboa.
- Alves, C. (2010). *Tratamento de Águas de Abastecimento (3.ª ed.)*. Porto. Portugal: Publindústria. Edições Técnicas.
- Amirtharajah, A. (1978). Optimum backwashing of sand filters. *Journ. Environmental Engineering*, 104, 917-932.
- APA - Agência Portuguesa do Ambiente. (2015). *Relatório de Estado do Ambiente 2015*.
- APA - Agência Portuguesa do Ambiente. (Julho de 2016). Obtido de <https://www.apambiente.pt>
- AWWA. (2011). *Operational Control of Coagulation and Filtration Processes (3ª ed.)*. Denver, USA: American Water Works Association.
- Babbitt, H. D. (1962). *Water Supply Engineering (6ª ed.)*. New York, USA: McGraw-Hill Book Company.
- Binnie, Chris; Kimber, Martin. (2013). *Basic Water Treatment (5ª ed.)*. London, UK: ICE Publishing.
- Bratby, J. (2006). *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment (2ª ed.)*. London, UK: IWA Publishing.
- Brito, A. G., Oliveira, J. M., & Peixoto, J. M. (2014). *Tratamento de Água para Consumo Humano e Uso Industrial: Elementos Teórico-prático (2ª ed.)*. Porto: Engenho e Média, Lda. I Grupo Publindústria.
- Castro, K., Gary, L., & Martin, S. R. (2008). High-Rate Granular Media Filtration. Em AWWA, ASCE, & E. E. Baruth (Ed.), *Water Treatment Plant Design*. USA: McGraw-Hill, Inc.
- Cheremisinoff, N. P. (2002). *Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies*. Butterworth-Heinemann.

- Cleasby, J. L., & Logsdon, G. S. (1999). Granular and Precoat Filtration. Em J. L. Cleasby, G. S. Logsdon, & R. D. Letterman (Ed.), *Water Quality and Treatment - A Handbook of Community Water Supplies* (5ª ed.). USA: McGRAW-HILL, INC.
- Colton, J., Hillis, P., & Caroline, F. (1996). Filter backwash and start-up strategies for enhanced particulate removal. *Water Research*, 30, 2502-2507.
- Degrémont Suez. (2007). *Water Treatment Handbook* (7ª ed., Vol. I). Lavoisier SAS.
- EPAL - Empresa Portuguesa das Águas Livres. (Julho de 2016). Obtido de <http://www.epal.pt>
- EPRI Project Managers. (2002). *Water and Sustainability: U.S. Electricity Consumption for Water Supply & Treatment*. The Next Half Century. ICF consulting.
- ERSAR - Entidade Reguladora de Serviços de Águas e Resíduos. (Maio de 2016). Obtido de <https://www.apambiente.pt/>
- Gregory, R., Zabel, T. F., & Edzwald, J. K. (1999). Sedimentation and Flotation. Em R. D. Letterman, *Water Quality and Treatment - A Handbook of Community Water Supplies* (5ª ed.). USA: McGRAW-HILL, INC.
- Haas, C. N. (1999). Disinfection. Em R. D. Letterman, *Water Quality and Treatment - A Handbook of Community Water Supplies* (5ª ed.). USA: McGRAW-HILL, INC.
- Hemming, D., & Fitzpatrick, C. (1997). Pressure signal analysis of combined water and air backwash of rapid gravity filters. *Water Research*, 31, 356-361.
- Kawamura, S. (1999). Design and Operation of high-rate filters. *Journal of American Water Works Association*, 91(12), 77-90.
- Kawamura, S. (2000). *Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities* (2ª ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Logsdon, G. S. (2008). *Water filtration practices: including slow sand filters and precoat filtration* (1ª ed.). Denver,, USA: American Water Works Association.
- Logsdon, G. S., Hess, A. F., Chipps, M. J., & Rachwal, A. J. (2002). *Filter Maintenance and Operations Guidance Manual*. (AWWA, Ed.) U.S.A.: Awwa Research Foundation and American Water Works Association.
- McGivney, W. T., & Kawamura, S. (2008). *Cost Estimating Manual for Water Treatment Facilities*. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Mendes, B., & Oliveira, J. F. (2004). *Qualidade da Água Para Consumo Humano*. Lisboa. Portugal: Lidel - Edições Técnicas, Lda.
- Ministério da Agricultura, Mar, Ambiente e Ordenamento do Território. (2011). *Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas* (Vols. Região Hidrográfica 7 - Volume 1).

- Nemerow, N. L., Agardy, F. J., Sullivan, P., & Salvato, J. A. (Edits.). (2009). *Environmental Engineering - Water, Wastewater, Soil and Groundwater Treatment and Remediation* (6^a ed.). New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Nixon, S. C., Lack, T. J., & Hunt, D. (2000). *Recursos hídricos na europa: uma utilização sustentável?* Agência Europeia do Ambiente, Copenhaga.
- PENSAAR 2020. (2015). *Uma nova Estratégia para o Setor de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais*. Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia.
- Plappally, A., & Lienhard, J. (2011). Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation and disposal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(16), 4818-4848.
- Rodrigues Carmona, Q. A., & Gomes, F. (1998). 4º Congresso da água: A qualidade da água no âmbito das bacias internacionais o exemplo da bacia do Guadiana. Lisboa.
- Rodrigues, H. (2008). Evolução da qualidade das origens de água e os limites de aplicabilidade de sistemas convencionais de tratamento de águas. Soluções de reabilitação - Monte Novo e Roxo. *Dissertação de Mestrado da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa*, 39-47.
- Satterfield, Z. (2005). Filter Backwashing. (W. V. University, Ed.) *Tech Brief*, 5(3).
- Siemens ICS SA. (2012). *Relatório Preliminar Auditoria Energética da ETA de Monte Novo*. Auditoria Energética, Siemens, Amadora.
- Silva, v. M., & Nunes, N. (2004). Aplicação em Portugal da Directiva 91/271/CEE - Águas Residuais Urbanas. *7º Congresso da Água*. Lisboa: APRH.
- Slavik, I., Jehmlich, A., & Uhl, W. (2013). Impact of backwashing procedures on deep bed filtration productivity in drinking water treatment. *Water Research*, 47, 6348-6357.
- SNIRH - Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos. (Novembro de 2016). Obtido de <http://snirh.pt>
- Spellman, F. R., & Drinan, J. E. (2012). *The Drinking Water Handbook*. New York, U.S.A.: CRC Press.
- Stevenson, D. (1995). Process Conditions for the backwash of filters with simultaneous air and water. *Water Research*, 29, 2594-2597.
- Stevenson, D. (1997). Flow and filtration through granular media - the effect of grain and particle size dispersion. *Water Research*, 31, 310-322.

- Tobiason, J. E., L., C. J., Logsdon, G. S., & O'Melia, C. R. (2010). Granular Media Filtration. Em AWWA, & J. K. Edzwald (Ed.), *Water Quality and Treatment - A Handbook on Drinking Water* (6ª ed.). Colorado, USA: McGraw Hill.
- UNESCO. (2009). *The United Nations World Water Development Report 3 - Water in Changing World*. Reino Unido: UNESCO.
- Vieira, J. (2003). *Gestão da Água em Portugal. Os Desafios do Plano Nacional da Água*. Braga: Universidade do Minho.
- WHO. (2011). *Guidelines for Drinking-water Quality* (4.^a ed.). WHO Library Cataloguing-in-Publication Data.
- WHO e UNICEF. (2000). *Global Water Supply and Sanitation assessment, 2000 Report*. WHO Library Cataloguing.
- WHO Regional Office for Europe. (2010). *Progress and challenges on water and health: the role of the Protocol on Water and Health*. WHO Library Cataloguing.

Anexos

Anexo I – Registos de turvação da água de lavagem dos filtros durante o período da fase de lavagem com ar

Tabela A.I. 1 - Registos de turvação da água de lavagem dos filtros, durante o período da fase de lavagem com ar

Filtro nº 1			Filtro nº 2			Filtro nº 3			Filtro nº 4			Filtro nº 5			Filtro nº 6			Filtro nº 7			Filtro nº 8		
Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)
12-7-16 14:33	00:00:30	29	12-7-16 14:00	00:00:30	27	14-7-16 14:05	00:00:30	40	12-7-16 14:15	00:00:30	66	14-7-16 13:25	00:00:30	35	14-7-16 15:00	00:00:30	51	12-7-16 14:00	00:00:30	54	14-7-16 13:45	00:00:30	20
	00:01:00	39		00:01:00	35		00:01:00	53		00:01:00	55		00:01:00	45		00:01:00	45		00:01:00	49		00:01:00	29
	00:01:30	54		00:01:30	53		00:01:30	59		00:01:30	61		00:01:30	54		00:01:30	52		00:01:30	52		00:01:30	40
	00:02:00	58		00:02:00	57		00:02:00	61		00:02:00	64		00:02:00	58		00:02:00	60		00:02:00	60		00:02:00	43
	00:02:30	70		00:02:30	67		00:02:30	62		00:02:30	60		00:02:30	61		00:02:30	57		00:02:30	58		00:02:30	45
	00:03:00	71		00:03:00	69		00:03:00	67		00:03:00	54		00:03:00	61		00:03:00	57		00:03:00	57		00:03:00	44
	00:03:30	73		00:03:30	70		00:03:30	70		00:03:30	52		00:03:30	62		00:03:30	50		00:03:30	49		00:03:30	43
	00:04:00	75		00:04:00	71		00:04:00	75		00:04:00	51		00:04:00	69		00:04:00	65		00:04:00	64		00:04:00	43
	00:04:30			00:04:30	71		00:04:30	73		00:04:30	54		00:04:30	67		00:04:30	62		00:04:30	62		00:04:30	42
	00:05:00			00:05:00	72		00:05:00	80		00:05:00			00:05:00	62		00:05:00	70		00:05:00	71		00:05:00	
	00:05:30			00:05:30			00:05:30			00:05:30			00:05:30			00:05:30	74		00:05:30	73		00:05:30	
	00:06:00			00:06:00			00:06:00			00:06:00			00:06:00			00:06:00	76		00:06:00	74		00:06:00	
Ar	00:04:00		Ar	00:03:45		Ar	00:04:26		Ar	00:04:30		Ar	00:05:00		Ar	00:06:00		Ar	00:06:00		Ar	00:04:30	
14-7-16 14:20	00:00:30	25	14-7-16 11:55	00:00:30	14	15-7-16 14:15	00:00:30	62	15-7-16 10:25	00:00:30	65	15-7-16 14:00	00:00:30	58	15-7-16 13:15	00:00:30	57	14-7-16 10:37	00:00:30	44	15-7-16 10:40	00:00:30	30
	00:01:00	38		00:01:00	22		00:01:00	57		00:01:00	58		00:01:00	49		00:01:00	45		00:01:00	40		00:01:00	44
	00:01:30	51		00:01:30	27		00:01:30	45		00:01:30	60		00:01:30	40		00:01:30	49		00:01:30	45		00:01:30	35
	00:02:00	59		00:02:00	33		00:02:00	48		00:02:00	61		00:02:00	45		00:02:00	44		00:02:00	44		00:02:00	35
	00:02:30	68		00:02:30	39		00:02:30	60		00:02:30	50		00:02:30	48		00:02:30	52		00:02:30	42		00:02:30	37
	00:03:00	74		00:03:00	45		00:03:00	55		00:03:00	54		00:03:00	54		00:03:00	46		00:03:00	43		00:03:00	39
	00:03:30	70		00:03:30	54		00:03:30	59		00:03:30	52		00:03:30	59		00:03:30	42		00:03:30	50		00:03:30	45
	00:04:00			00:04:00	62		00:04:00	60		00:04:00	51		00:04:00	61		00:04:00	48		00:04:00	52		00:04:00	52
	00:04:30			00:04:30	65		00:04:30	65		00:04:30	54		00:04:30	61		00:04:30	53		00:04:30	55		00:04:30	55
	00:05:00			00:05:00	66		00:05:00			00:05:00			00:05:00	63		00:05:00	60		00:05:00	54		00:05:00	55
	00:05:30			00:05:30			00:05:30			00:05:30			00:05:30			00:05:30			00:05:30	59		00:05:30	44
	00:06:00			00:06:00			00:06:00			00:06:00			00:06:00			00:06:00			00:06:00			00:06:00	
Ar	00:03:45		Ar	00:05:00		Ar	00:04:30		Ar	00:04:30		Ar	00:05:00		Ar	00:05:00		Ar	00:05:00		Ar	00:05:30	

Tabela A.I. 2 - Registos de turvação da água de lavagem dos filtros, durante o período da fase de lavagem com ar

Filtro nº 1			Filtro nº 2			Filtro nº 3			Filtro nº 4			Filtro nº 5			Filtro nº 6			Filtro nº 7			Filtro nº 8			
Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	
15-7-16 13:40	00:00:30	55	15-7-16 11:10	00:00:30	35													15-7-16 10:00	00:00:30	40				
	00:01:00	53		00:01:00	37														00:01:00	38				
	00:01:30	44		00:01:30	32														00:01:30	45				
	00:02:00	42		00:02:00	39														00:02:00	43				
	00:02:30	49		00:02:30	42														00:02:30	40				
	00:03:00	48		00:03:00	47														00:03:00	44				
	00:03:30	53		00:03:30	48														00:03:30	49				
	00:04:00	55		00:04:00	51														00:04:00	52				
	00:04:30	59		00:04:30	59														00:04:30	54				
	00:05:00	61		00:05:00	60														00:05:00	52				
	00:05:30	62		00:05:30															00:05:30	59				
	00:06:00			00:06:00															00:06:00					
Ar		00:05:30	Ar		00:05:00														Ar		00:05:00			
Média	00:00:30	36.33	Média	00:00:30	25.33	Média	00:00:30	51.00	Média	00:00:30	65.50	Média	00:00:30	46.50	Média	00:00:30	54.00	Média	00:00:30	46.00	Média	00:00:30	25.00	
	00:01:00	43.33		00:01:00	31.33		00:01:00	55.00		00:01:00	56.50		00:01:00	47.00		00:01:00	45.00		00:01:00	42.33		00:01:00	36.50	
	00:01:30	49.67		00:01:30	37.33		00:01:30	52.00		00:01:30	60.50		00:01:30	47.00		00:01:30	50.50		00:01:30	47.33		00:01:30	37.50	
	00:02:00	53.00		00:02:00	43.00		00:02:00	54.50		00:02:00	62.50		00:02:00	51.50		00:02:00	52.00		00:02:00	49.00		00:02:00	39.00	
	00:02:30	62.33		00:02:30	49.33		00:02:30	61.00		00:02:30	55.00		00:02:30	54.50		00:02:30	54.50		00:02:30	46.67		00:02:30	41.00	
	00:03:00	64.33		00:03:00	53.67		00:03:00	61.00		00:03:00	54.00		00:03:00	57.50		00:03:00	51.50		00:03:00	48.00		00:03:00	41.50	
	00:03:30	65.33		00:03:30	57.33		00:03:30	64.50		00:03:30	52.00		00:03:30	60.50		00:03:30	46.00		00:03:30	49.33		00:03:30	44.00	
	00:04:00	65.00		00:04:00	61.33		00:04:00	67.50		00:04:00	51.00		00:04:00	65.00		00:04:00	56.50		00:04:00	56.00		00:04:00	47.50	
	00:04:30	59.00		00:04:30	65.00		00:04:30	69.00		00:04:30	54.00		00:04:30	64.00		00:04:30	57.50		00:04:30	57.00		00:04:30	48.50	
	00:05:00	61.00		00:05:00	66.00		00:05:00	80.00		00:05:00			00:05:00	62.50		00:05:00	65.00		00:05:00	59.00		00:05:00	55.00	
	00:05:30	62.00		00:05:30			00:05:30			00:05:30			00:05:30			00:05:30			00:05:30	63.67		00:05:30		
	00:06:00			00:06:00			00:06:00			00:06:00			00:06:00			00:06:00			00:06:00			00:06:00		
Ar		00:04:25	Ar		00:04:35	Ar		00:04:28	Ar		00:04:30	Ar		00:05:00	Ar		00:05:30	Ar		00:05:20	Ar		00:05:00	

Anexo II – Registos de turvação da água de lavagem dos filtros durante o período da fase de lavagem com água

Tabela A.II. 1 - Registos de turvação da água de lavagem dos filtros durante o período da fase de lavagem com água

Filtro nº 1			Filtro nº 2			Filtro nº 3			Filtro nº 4			Filtro nº 5			Filtro nº 6			Filtro nº 7			Filtro nº 8		
Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)
12-7-16 14:33	00:00:30	76	12-7-16 14:00	00:00:30	80	14-7-16 14:05	00:00:30	66	12-7-16 14:15	00:00:30	79	14-7-16 13:25	00:00:30	71	14-7-16 15:15	00:00:30	71	12-7-16 14:00	00:00:30	79	14-7-16 13:45	00:00:30	70
	00:01:00	72		00:01:00	80		00:01:00	67		00:01:00	83		00:01:00	79		00:01:00	70		00:01:00	64		00:01:00	69
	00:01:30	70		00:01:30	70		00:01:30	70		00:01:30	69		00:01:30	67		00:01:30	66		00:01:30	70		00:01:30	68
	00:02:00	67		00:02:00	63		00:02:00	49		00:02:00	55		00:02:00	65		00:02:00	60		00:02:00	56		00:02:00	52
	00:02:30	54		00:02:30	49		00:02:30	32		00:02:30	40		00:02:30	44		00:02:30	55		00:02:30	49		00:02:30	32
	00:03:00	47		00:03:00	47		00:03:00	22		00:03:00	41		00:03:00	31		00:03:00	42		00:03:00	50		00:03:00	22
	00:03:30	40		00:03:30	29		00:03:30	18		00:03:30	20		00:03:30	23		00:03:30	32		00:03:30	40		00:03:30	19
	00:04:00	37		00:04:00	23		00:04:00	16		00:04:00	19		00:04:00	20		00:04:00	25		00:04:00	38		00:04:00	17
	00:04:30	31		00:04:30	21		00:04:30	11		00:04:30	16		00:04:30	13		00:04:30	21		00:04:30	35		00:04:30	12
	00:05:00	26		00:05:00	14		00:05:00	10		00:05:00	13		00:05:00	12		00:05:00	15		00:05:00	25		00:05:00	11
	00:05:30	24		00:05:30	12		00:05:30	8		00:05:30	12		00:05:30	10		00:05:30	14		00:05:30	23		00:05:30	8
	00:06:00	20		00:06:00	9		00:06:00	7		00:06:00	8		00:06:00	11		00:06:00	10		00:06:00	20		00:06:00	8
	00:06:30	14		00:06:30	7		00:06:30			00:06:30	7		00:06:30	6		00:06:30			00:06:30	14		00:06:30	7
	00:07:00			00:07:00			00:07:00			00:07:00	5		00:07:00	6		00:07:00			00:07:00	13		00:07:00	7
	00:07:30			00:07:30			00:07:30			00:07:30	5		00:07:30			00:07:30			00:07:30	11		00:07:30	6
Ar	00:03:45		Ar	00:07:07		Ar	00:05:00		Ar	00:04:26		Ar	00:05:00		Ar	00:06:00		Ar	00:05:00		Ar	00:04:30	
Água	00:06:11		Água	00:06:26		Água	00:06:00		Água	00:06:30		Água	00:06:30		Água	00:06:00		Água	00:07:45		Água	00:07:00	
14-7-16 14:20	00:00:30	75	14-7-16 11:55	00:00:30	80	15-7-16 14:15	00:00:30	70	15-7-16 10:25	00:00:30	68	15-7-16 14:00	00:00:30	65	15-7-16 13:15	00:00:30	65	14-7-16 10:37	00:00:30	90	15-7-16 10:40	00:00:30	76
	00:01:00	74		00:01:00	74		00:01:00	69		00:01:00	60		00:01:00	59		00:01:00	61		00:01:00	88		00:01:00	68
	00:01:30	65		00:01:30	69		00:01:30	52		00:01:30	49		00:01:30	64		00:01:30	55		00:01:30	74		00:01:30	56
	00:02:00	63		00:02:00	64		00:02:00	51		00:02:00	46		00:02:00	59		00:02:00	49		00:02:00	70		00:02:00	44
	00:02:30	52		00:02:30	52		00:02:30	44		00:02:30	38		00:02:30	51		00:02:30	46		00:02:30	54		00:02:30	36
	00:03:00	48		00:03:00	45		00:03:00	29		00:03:00	30		00:03:00	39		00:03:00	33		00:03:00	48		00:03:00	29
	00:03:30	34		00:03:30	47		00:03:30	21		00:03:30	23		00:03:30	29		00:03:30	25		00:03:30	36		00:03:30	20
	00:04:00	31		00:04:00	41		00:04:00	14		00:04:00	19		00:04:00	22		00:04:00	19		00:04:00	32		00:04:00	14
	00:04:30	24		00:04:30	25		00:04:30	11		00:04:30	14		00:04:30	18		00:04:30	14		00:04:30	27		00:04:30	14
	00:05:00	20		00:05:00	19		00:05:00	8		00:05:00	9		00:05:00	12		00:05:00	12		00:05:00	23		00:05:00	9
	00:05:30	15		00:05:30	12		00:05:30	7		00:05:30	4		00:05:30	9		00:05:30	8		00:05:30	18		00:05:30	9
	00:06:00			00:06:00	9		00:06:00	5		00:06:00	4		00:06:00	7		00:06:00	7		00:06:00	14		00:06:00	
	00:06:30			00:06:30	8		00:06:30			00:06:30			00:06:30			00:06:30			00:06:30	13		00:06:30	
	00:07:00			00:07:00			00:07:00			00:07:00			00:07:00			00:07:00			00:07:00	13		00:07:00	
	00:07:30			00:07:30			00:07:30			00:07:30			00:07:30			00:07:30			00:07:30			00:07:30	
Ar	00:03:45		Ar	00:07:07		Ar	00:05:00		Ar	00:04:30		Ar	00:05:00		Ar	00:05:00		Ar	00:05:00		Ar	00:05:30	
Água	00:06:00		Água	00:06:00		Água	00:06:00		Água	00:06:00		Água	00:06:00		Água	00:06:00		Água	00:06:30		Água	00:05:30	

Tabela A.II. 2 - Registos de turvação da água de lavagem dos filtros durante o período da fase de lavagem com água

Filtro nº 1			Filtro nº 2			Filtro nº 3			Filtro nº 4			Filtro nº 5			Filtro nº 6			Filtro nº 7			Filtro nº 8		
Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)	Data	Hora	Turvação (NTU)
15-7-16 13:40	00:00:30	66	15-7-16 11:10	00:00:30	64													15-7-16 10:00	00:00:30	62			
	00:01:00	59		00:01:00	59														00:01:00	59			
	00:01:30	62		00:01:30	48														00:01:30	54			
	00:02:00	50		00:02:00	51														00:02:00	50			
	00:02:30	39		00:02:30	32														00:02:30	39			
	00:03:00	33		00:03:00	30														00:03:00	30			
	00:03:30	28		00:03:30	27														00:03:30	24			
	00:04:00	22		00:04:00	21														00:04:00	17			
	00:04:30	19		00:04:30	15														00:04:30	14			
	00:05:00	16		00:05:00	11														00:05:00	13			
	00:05:30	13		00:05:30	10														00:05:30	11			
	00:06:00	9		00:06:00	9														00:06:00	8			
	00:06:30			00:06:30															00:06:30	6			
00:07:00		00:07:00		00:07:00	6																		
00:07:30		00:07:30		00:07:30	5																		
Ar	00:05:30		Ar	00:05:07																			
Água	00:06:00		Água	00:06:00																			

Média	00:00:30	72.33	Média	00:00:30	80.00	Média	00:00:30	68.00	Média	00:00:30	73.50	15-7-16 13:40	Média	00:00:30	68.00	Média	00:00:30	68.00	Média	00:00:30	77.00	Média	00:00:30	73.00
	00:01:00	68.33		00:01:00	71.00		00:01:00	68.00		00:01:00	71.50			00:01:00	69.00		00:01:00	65.50		00:01:00	70.33		00:01:00	68.50
	00:01:30	65.67		00:01:30	62.33		00:01:30	61.00		00:01:30	59.00			00:01:30	65.50		00:01:30	60.50		00:01:30	66.00		00:01:30	62.00
	00:02:00	60.00		00:02:00	59.33		00:02:00	50.00		00:02:00	50.50			00:02:00	62.00		00:02:00	54.50		00:02:00	58.67		00:02:00	48.00
	00:02:30	48.33		00:02:30	44.33		00:02:30	38.00		00:02:30	39.00			00:02:30	47.50		00:02:30	50.50		00:02:30	47.33		00:02:30	34.00
	00:03:00	42.67		00:03:00	40.67		00:03:00	25.50		00:03:00	35.50			00:03:00	35.00		00:03:00	37.50		00:03:00	42.67		00:03:00	25.50
	00:03:30	34.00		00:03:30	34.33		00:03:30	19.50		00:03:30	21.50			00:03:30	26.00		00:03:30	28.50		00:03:30	33.33		00:03:30	19.50
	00:04:00	30.00		00:04:00	28.33		00:04:00	15.00		00:04:00	19.00			00:04:00	21.00		00:04:00	22.00		00:04:00	29.00		00:04:00	15.50
	00:04:30	24.67		00:04:30	20.33		00:04:30	11.00		00:04:30	15.00			00:04:30	15.50		00:04:30	17.50		00:04:30	25.33		00:04:30	13.00
	00:05:00	20.67		00:05:00	14.67		00:05:00	9.00		00:05:00	11.00			00:05:00	12.00		00:05:00	13.50		00:05:00	20.33		00:05:00	10.00
	00:05:30	17.33		00:05:30	11.33		00:05:30	7.50		00:05:30	8.00			00:05:30	9.50		00:05:30	11.00		00:05:30	17.33		00:05:30	8.50
	00:06:00	14.50		00:06:00	9.00		00:06:00	6.00		00:06:00	6.00			00:06:00	9.00		00:06:00	8.50		00:06:00	14.00		00:06:00	8.00
	00:06:30	14.00		00:06:30	7.50		00:06:30			00:06:30	7.00			00:06:30	6.00		00:06:30			00:06:30	11.00		00:06:30	7.00
00:07:00		00:07:00		00:07:00		00:07:00	5.00	00:07:00	6.00	00:07:00		00:07:00	10.67	00:07:00	7.00									
00:07:30		00:07:30		00:07:30		00:07:30	5.00	00:07:30		00:07:30		00:07:30	8.00	00:07:30	6.00									
Ar	00:04:25		Ar	00:04:35		Ar	00:04:28		Ar	00:04:30		Ar	00:05:00		Ar	00:05:30		Ar	00:08:00	4.00		Ar	00:05:00	
Água	00:06:04		Água	00:06:09		Água	00:06:00		Água	00:06:15		Água	00:06:15		Água	00:06:00		Água	00:08:35	3.00		Água	00:06:15	
																		Média	00:08:30	3.00				
																			00:09:00	3.00				
																			00:09:30	3.00				
																			00:10:00	3.00				
																			00:10:30	3.00				
																			00:11:00	3.00				
																		00:11:30	3.00					
																		Ar	00:05:20					
																		Água	00:08:35					

Anexo III – Turvação (NTU) da água da água captada, a montante e jusante dos sistema de filtração e respetiva eficiência de remoção

Tabela A.III. 1 - Turvação (NTU) da água da água captada, a montante e jusante dos sistema de filtração e respetiva eficiência de remoção

Data	Turvação água Captada	Turvação a montante dos filtros	Eficiência de remoção a montante dos filtros	Turvação a jusante dos filtros	Eficiência de remoção nos filtros
jan-14	15.86	0.84	94%	0.34	58%
fev-14	42.06	1.93	95%	0.54	70%
mar-14	34.69	1.59	95%	0.40	74%
abr-14	17.51	3.65	77%	0.39	88%
mai-14	33.70	2.84	90%	0.33	87%
jun-14	40.83	2.41	94%	0.34	85%
jul-14	33.76	2.04	94%	0.32	84%
ago-14	14.48	0.92	93%	0.28	68%
set-14	12.83	1.05	89%	0.29	72%
out-14	13.83	1.16	91%	0.28	76%
nov-14	16.73	1.63	89%	0.26	81%
dez-14	28.36	1.27	96%	0.37	67%
jan-15	23.87	0.94	96%	0.32	66%
fev-15	21.02	0.92	96%	0.35	61%
mar-15	12.16	1.12	89%	0.31	68%
abr-15	7.45	1.15	84%	0.31	73%
mai-15	17.30	1.38	91%	0.30	77%
jun-15	27.56	1.69	94%	0.29	83%
jul-15	12.59	1.13	89%	0.27	73%
ago-15	6.80	0.75	89%	0.27	64%
set-15	7.19	0.84	88%	0.32	62%
out-15	7.35	0.81	88%	0.31	61%
nov-15	7.59	1.07	85%	0.33	69%
dez-15	10.25	0.73	91%	0.29	55%
jan-16	19.49	0.59	97%	0.26	54%
fev-16	10.60	0.56	94%	0.29	48%
mar-16	10.88	0.55	94%	0.30	44%
abr-16	6.62	0.77	88%	0.25	64%
mai-16	8.67	1.26	85%	0.31	71%
jun-16	8.14	0.97	87%	0.38	60%
jul-16	9.64	1.06	89%	0.36	66%

Anexo IV – Análise de turvação da água filtrada após lavagem com o método (5+11)

Tabela A.IV. 1 -- Análise de turvação da água filtrada após lavagem com o método (5+11)

Filtro 3		Filtro 6		Filtro 3		Filtro 6		Filtro 3	
5 ar + 5 água		5 ar + 10 água		5 ar + 10 água		5 ar + 5 água		5 ar + 5 água	
Tempo (min)	Turvação (NTU)	Tempo (min)	Turvação (NTU)	Tempo (min)	Turvação (NTU)	Tempo (min)	Turvação (NTU)	Tempo (min)	Turvação (NTU)
00:00	0.5	00:00	0.36	00:00	0.44	00:00	0.30	00:00	0.29
00:01	0.7	00:01	0.39	00:01	0.59	00:01	0.34	00:01	0.33
00:02	0.5	00:02	0.46	00:02	0.55	00:02	0.46	00:02	0.51
00:03	0.5	00:03	0.47	00:03	0.45	00:03	0.40	00:03	0.53
00:04	0.5	00:04	0.49	00:04	0.49	00:04	0.43	00:04	0.59
00:05	0.4	00:05	0.45	00:05	0.48	00:05	0.42	00:05	0.49
00:06	0.4	00:06	0.45	00:06	0.40	00:06	0.39	00:06	0.49
00:07	0.4	00:07	0.41	00:07	0.39	00:07	0.37	00:07	0.47
00:08	0.4	00:08	0.42	00:08	0.47	00:08	0.34	00:08	0.42
00:09	0.5	00:09	0.42	00:09	0.45	00:09	0.35	00:09	0.40
00:10	0.5	00:10	0.40	00:10	0.40	00:10	0.33	00:10	0.39
00:11	0.4	00:40	0.36	00:40	0.41	00:40	0.34	00:40	0.43
00:12	0.4	01:10	0.34	01:10	0.45	01:10	0.32	01:10	0.50
00:13	0.4	01:40	0.31	01:40	0.39	01:40	0.33	01:40	0.51
00:14	0.4	02:10	0.32	02:10	0.41	02:10	0.35	02:10	0.55
00:15	0.4	02:40	0.34			02:40	0.37		
		03:10	0.34			03:10	0.31		
		03:40	0.36			03:40	0.33		
		04:10	0.31			04:10	0.39		
		04:40	0.32			04:40	0.41		

Anexo V – Análise de turvação da água filtrada após lavagem com o método (3+3+3)

Tabela A.V. 1 – Análise de turvação da água filtrada após lavagem com o método (3+3+3)

Filtro 2		Filtro 7	
3 ar + 3 ar e água + 3 água		3 ar + 3 ar e água + 3 água	
Início	Fim	Início	Fim
16:38:00	20:58	16:55:00	21:40
Tempo (min)	Turvação (NTU)	Tempo (min)	Turvação (NTU)
00:00	0.29	00:00	0.36
00:01	0.74	00:01	0.63
00:02	0.39	00:02	0.69
00:03	0.60	00:03	0.63
00:04	0.36	00:04	0.69
00:05	0.29	00:05	0.58
00:06	0.36	00:06	0.55
00:07	0.34	00:07	0.59
00:08	0.38	00:08	0.53
00:09	0.42	00:09	0.52
00:10	0.39	00:10	0.60
00:11	0.36	00:11	0.51
00:12	0.40	00:12	0.52
00:13	0.36	00:13	0.49
00:14	0.35	00:14	0.59
00:15	0.39	00:15	0.55